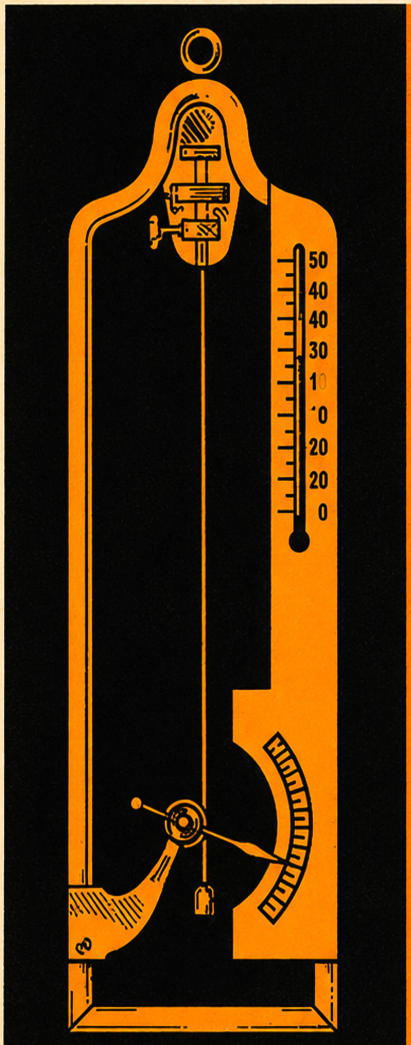
А. В. ПЕРЫШКИН

КУРС ФИЗИКИ



ЧАСТЬ 2

А. В. ПЁРЫШКИН

КУРС ФИЗИКИ

УЧЕБНИК ДЛЯ СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

МЕХАНИКА (продолжение), ТЕПЛОТА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

ИЗДАНИЕ ТРИНАДЦАТОЕ

Утверждён
Министерством просвещения РСФСР

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПРОСВЕЩЕНИЕ»
МОСКВА 1966

ОГЛАВЛЕНИЕ

Раздел I

МЕХАНИКА (продолжение)

Глава I. **Криволинейное движение тел. Вращательное движение**

1. Движение тел под действием силы, направленной под углом к скорости 3
2. Независимость движений. Движение тела, брошенного горизонтально 5
3. Движение тела, брошенного под углом к горизонту 7
4. Равномерное движение по окружности. Угловая скорость. Период обращения 10
5. Линейная скорость. Связь между угловой и линейной скоростями . . . 11
6. Центростремительное ускорение . . 13
7. Центростремительная сила 14
8. Примеры действия центростремительной силы 16
9. Третий закон Ньютона в применении к движению тел по окружности 22
10. Центробежные механизмы 23
11. Вращательное движение твердых тел 24
12. Тахометр 26
13. Силы, действующие на твёрдое тело, вращающееся вокруг оси . . . 27
14. Передача вращения от двигателя к машине-орудию . . . . . —
15. Ремённая передача 28
16. Фрикционная передача 29
17. Зубчатая передача 30

Глава II. **Колебания и волны**

18. Периодическое движение 34
19. Гармоническое (простое) колебание —
20. Амплитуда, частота и период колебания 36
21. Колебания под действием силы тяжести 37
22. Законы колебания математического маятника 39
23. Графическая запись колебательного движения 41
24. Фаза колебаний. Сдвиг фаз 42
25. Превращения энергии при колебаниях маятника 44
26. Затухающие колебания 45
27. Применение маятника в часах . . . 47
27а. Сложение гармонических колебательных движений . . . . . —
28. Вынужденные колебания 49
29. Резонанс 50
30. Значение резонанса в технике . . . 52
31. Волновое движение. Образование поперечных волн 53
32. Продольные волны 56
33. Длина волны и скорость распространения волн 58

Глава III. **Звук**

34. Происхождение звука 59
35. Простой вид звуковых колебаний 60
36. Классификация звуков 61
37. Распространение звука . . . . . —
38. Скорость распространения звука . . 62
39. Музыкальные звуки. Высота тона 63
40. Сила и громкость звука 64
41. Тембр звука 66
42. Отражение звуковых волн 68
43. Стоячие волны 69
44. Наблюдение звуковых стоячих волн 70
45. Звуковой резонанс и резонаторы 71
46. Физика уха 73
47. Запись и воспроизведение звука —

Глава IV. **Движение жидкости и газа**

48. Давление. Сила давления 76
49. Наблюдение движения жидкости 77
50. Стационарное движение жидкости 78
51. Давление в движущейся жидкости 79
52. Всасывающее действие струи жидкости и его практическое использование 82
53. Внутреннее трение в жидкостях и газах 84
54. Сопротивление при движении тела в жидкости и газе 85
55. Обтекание тела жидкостью или газом 86
56. Подъёмная сила 88
57. Использование энергии движущейся воды 91
58. Гидравлические двигатели . . . . . —
59. Ветряные двигатели 95

Раздел II

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕПЛОТА

Глава V. **Основы молекулярно-кинетической теории строения вещества**

60. Развитие молекулярно-кинетической теории 98
61. Броуновское движение 99
62. Диффузия 101
63. О земной атмосфере 102
64. Опыты, объясняемые молекулярно-кинетической теорией 103
65. Число молекул в единице объёма вещества. Размеры молекул 104
66. Скорость движения молекул 105
67. Число столкновений и средняя длина свободного пробега молекул 106
68. Силы взаимодействия между молекулами 107
69. Тепловое движение. Температура 109

Глава VI. Теплота и работа

70. Энергия движения и взаимодействия молекул. Внутренняя энергия тел 111
71. Изменение внутренней энергии тела . . . . . —
72. Единица количества теплоты . . . 112
73. Понятие о теплоёмкости тела. Удельная теплоёмкость вещества 113
74. Измерение удельной теплоёмкости 115
75. Развитие взглядов на природу теплоты 116
76. Механический эквивалент теплоты 117
77. Закон сохранения и превращения энергии 120

Глава VII. Тепловое расширение твёрдых и жидких тел

78. Зависимость объёма тел от температуры 123
79. Линейное расширение твёрдых тел —
80. Объёмное расширение твёрдых тел 124
81. Учёт теплового расширения в технике 125
81а. Терморегулятор 126
82. Тепловое расширение жидкостей 127

Глава VIII. Свойства газов

83. Давление газов 129
84. Зависимость между объёмом и давлением газа. Закон Бойля—Мариотта . . . . . —
85. Зависимость между плотностью газа и его давлением 132
86. Зависимость объёма газа от температуры. Закон Гей-Люссака . . 133
87. Зависимость давления газа от температуры. Закон Шарля 136
88. Абсолютная шкала температур . . 138
89. Зависимость между объёмом, давлением и температурой газа. Объединённый закон газового состояния 140
90. Физическая сущность понятия абсолютного нуля 141
91. Изменение температуры газа при быстром расширении и сжатии . . 142
92. Применение сжатых газов 143

Глава IX. Свойства жидкостей

93. Молекулярное движение в жидкостях 146
94. Поверхностное натяжение 147
95. Коэффициент поверхностного натяжения 148
96. Смачивание 150
97. Капиллярность 152

Глава X. Свойства твёрдых тел

98. Кристаллические и аморфные тела 155
99. Пространственные решётки . . . 157
100. Деформация твёрдых тел 158
101. Упругость и пластичность 159
102. Виды деформаций 160
102а. Твёрдость 163
102б. Закон Гука 164
103. Прочность. Запас прочности . . . 166
103а. Значение свойств материалов для их обработки и применения 167

Глава XI. Изменение агрегатного состояния вещества

104. Плавление тел 170
105. Удельная теплота плавления . . 171
106. Изменение объёма тела при плавлении и отвердевании 173
107. Литьё металлов . . . . . —
108. Сплавы и их применение в технике 176
109. Испарение 177
110. Охлаждение при испарении . . . 178
111. Насыщающий пар 179
112. Давление насыщающего пара . . . —
113. Независимость давления и плотности насыщающего пара от его объёма 180
114. Ненасыщающий пар 181
115. Кипение 182
116. Удельная теплота парообразования 184
117. Влажность воздуха 186
118. Способы определения влажности воздуха 188
119. Волосной гигрометр . . . . . —
120. Психрометр Августа . . . . . —
121. Критическая температура 190
122. Сжижение газов 192
123. Свойства сжиженных газов . . . 194

Глава XII. Тепловые двигатели

124. Работа при расширении газа . . . 195
125. Тепловой двигатель. Условия, необходимые для работы теплового двигателя . . . . . —
126. Коэффициент полезного действия тепловых двигателей 197
127. Паровая машина 198
128. Паровые котлы 201
129. Паровые турбины 202
130. Двигатель внутреннего сгорания 206
131. Двигатель внутреннего сгорания — дизель 210
132. Реактивные двигатели 212
133. Основные виды реактивных двигателей 214

Приложение

I. Дополнение к теме «Звук». Ультразвук и его применение

1. Генераторы и приёмники ультразвука 218
2. Гидролокация 220
3. Ультразвуковая дефектоскопия 221
4. Некоторые другие свойства и применения ультразвука . . . . —

II. Дополнение к теме «Всемирное тяготение»

1. Изменение силы тяжести с широтой места и высотой над поверхностью Земли 222
2. Поле тяготения 223
3. Искусственные спутники Земли (ИСЗ) 225
4. Состояние невесомости 227
5. Перегрузки 229

III. Дополнение к теме «Свойства твёрдых тел»

1. Изменение свойств и структуры металлов при механической и термической обработке 231
2. Обработка металлов резанием 232
3. Понятие о физических свойствах полимеров. Применение полимеров 233

Раздел «Теплота и молекулярная физика» составлен при участии Н. П. Суворова.

Александр Васильевич Пёрышкин
КУРС ФИЗИКИ, ч. II, ДЛЯ СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

Редактор *Л. Л. Величко.* Художественный редактор *Б. Л. Николаев.*
Технический редактор *Н. Н. Махова.* Корректор *Т. М. Графовская*

Подписано к печати с матриц 3/VII 1965 г. 60×90¹/₁₆. Печ. л. 15. Уч.-изд. л. 15,43.
Тираж 800 тыс. экз.

Издательство «Просвещение» Государственного комитета Совета Министров РСФСР по печати. Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Ленинградская типография № 1 «Печатный Двор» им. А. М. Горького «Главполиграфпрома» Государственного комитета Совета Министров СССР по печати, Гатчинская, 26. Заказ 1815.

Цена без переплёта 20 коп. Переплёт бум. 8 коп., коленкоровый 15 коп.

РАЗДЕЛ I
МЕХАНИКА (продолжение)

ГЛАВА I
КРИВОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ. ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ

1. Движение тел под действием силы, направленной под углом к скорости. При рассмотрении прямолинейного движения было показано, что если на тело действует сила в направлении движения, то движение тела будет оставаться прямолинейным. Изменяться будет только величина скорости. При этом, если направление силы совпадает с направлением скорости, движение будет прямолинейным и ускоренным. В случае же противоположного направления силы движение окажется прямолинейным и замедленным. Таковы, например, движение тела, брошенного вертикально вниз, и движение тела, брошенного вертикально вверх.

Рассмотрим теперь, как будет двигаться тело под действием силы, направленной под углом к направлению скорости.

Обратимся сначала к опыту. На рисунке 1 изображена траектория движения стального шарика. По ней видно, что вдали от магнита шарик двигался прямолинейно, при приближении же к магниту траектория шарика искривлялась и шарик двигался по кривой. Направление скорости его при этом непрерывно менялось. Причиной этого было действие магнита на шарик.

Мы можем заставить двигаться по кривой прямолинейно перемещающееся тело, если будем толкать его, тянуть за привязанную к нему нить и так далее, лишь бы сила была направлена под углом к скорости перемещения тела.

Итак, *криволинейное движение тела происходит под действием силы, направленной под углом к направлению скорости тела.*

В зависимости от направления и величины силы, действующей на тело, криволинейные движения могут быть самыми разнообразными. Наиболее простыми видами криволинейных движений являются движения по окружности, параболе и эллипсу.

Рассмотрим теперь вопрос о направлении вектора скорости в криволинейном движении. В случае прямолинейного движения направление вектора скорости совпадает с направлением перемеще-

ния. Но в криволинейном движении нет постоянного направления перемещения. Что же в таком случае следует принимать за направление скорости в криволинейном движении?

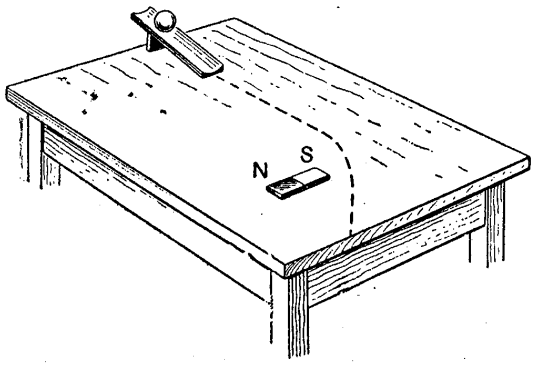


Рис. 1. Магнит искривляет траекторию шарика.

Проще всего установить направление вектора скорости при движении тела по окружности. Приведём в быстрое вращение точильный камень и коснёмся его куском стали. Мы увидим целый сноп искр, вылетающих от места прикосновения стали к камню (рис. 2). Эти мелкие раскалённые частички камня и стали, оторвавшись, летят по инерции прямолинейно со скоростью, которой они обладали в момент отрыва. Передвигая кусок стали по окружности камня, можно видеть, что во всех случаях искры летят по касательной к окружности в той точке, к которой прикасается сталь.

По касательной к окружности полетит камень, вращающийся на нити, если нить внезапно оборвётся (рис. 3).

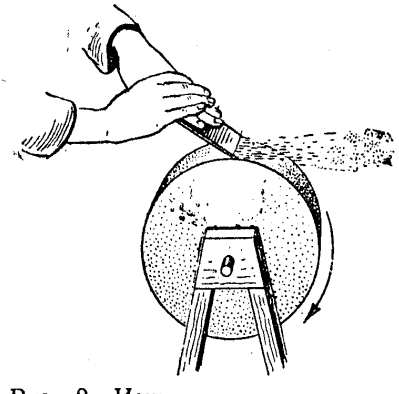


Рис. 2. Искры из-под предмета, обтачиваемого на точильном круге, летят по касательным к окружности.

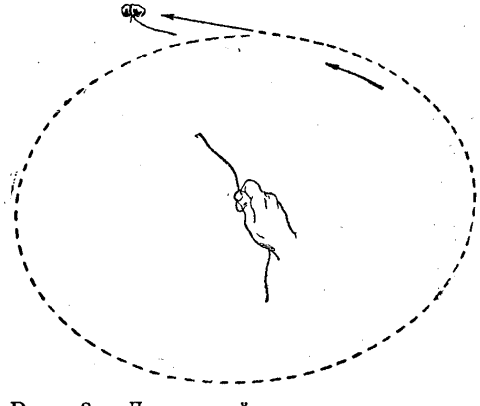


Рис. 3. Движущийся по окружности камень при обрыве нити отлетает по касательной к окружности.

Из описанных опытов следует, что *скорость в данной точке окружности направлена по касательной к окружности в этой точке.*

Этот вывод можно распространить на любое криволинейное движение.

Пусть *ABCD* (рис. 4) есть траектория движения.

Допустим, что перемещение точки происходит не по кривой, а по ломаной $AB - BC - CD...$

Направление вектора скорости на участках ломаной будет совпадать с хордами, изменяясь лишь в точках A, B, C... Разбивая траекторию $ABCD...$ на большее число частей, мы делаем прямолинейные участки пути всё короче и короче. При этом перемещение по хордам будет всё меньше отличаться от перемещения по кривой $ABCD...$ Хорды же AB, BC, CD всё ближе и ближе будут подходить к касательным в точках $A, B, C, D...$

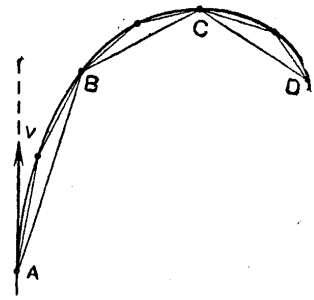


Рис. 4. Скорость в криволинейном движении направлена по касательной к кривой в данной точке траектории.

В пределе, когда, например, отрезок AB станет бесконечно малым, т. е. точка B станет бесконечно близка к точке A, хорда AB совпадёт с касательной AV. Также и направление скорости на прямолинейном участке хорды AB в пределе примет направление касательной в точке A. Аналогичные рассуждения можно провести относительно любой другой точки B, C, D... траектории.

Итак, ***скорость в данной точке криволинейной траектории направлена по касательной, проведённой к кривой в этой точке.***

2. Независимость движений. Движение тела, брошенного горизонтально. Всякое криволинейное движение является сложным движением, состоящим из движения по инерции и движения под действием силы, направленной под углом к скорости тела. Это можно показать на следующем примере.

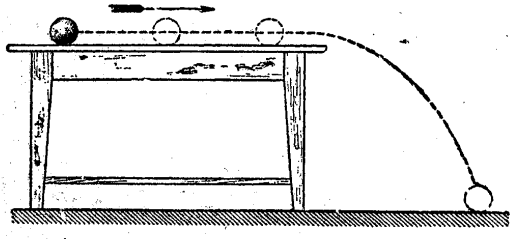


Рис. 5. Траектория движения шарика, скатывающегося со стола.

Допустим, что шарик движется по столу равномерно и прямолинейно. Когда шарик скатывается со стола, вес его больше уже не уравновешивается силой давления стола и он, по инерции сохраняя равномерное и прямолинейное движение, одновременно начинает падать. В результате сложения движений — равномерного прямолинейного по инерции и равноускоренного под действием силы тяжести — шарик перемещается по кривой линии (рис. 5).

Можно на опыте показать, что эти движения независимы одно от другого.

На рисунке 6 изображена пружина, которая, выгибаясь под ударом молотка, может привести один из шариков в движение в гори-

зонтальном направлении и одновременно освободить другой шарик, так что оба они начнут движение в один и тот же момент: первый — по кривой, второй — по вертикали вниз. Оба шарика ударятся о пол одновременно; следовательно, время падения обоих шариков одинаково. Отсюда можно заключить, что движение шарика под действием силы тяжести не зависит от того, покоился ли шарик в начальный момент или двигался в горизонтальном направлении.

Этот опыт иллюстрирует очень важное положение механики, называемое принципом независимости движений.

Если тело участвует одновременно в нескольких движениях, то каждое из этих движений происходит независимо от других.

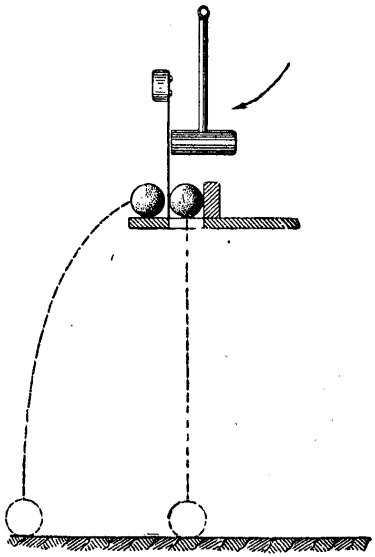


Рис. 6. Оба шарика достигают пола одновременно.

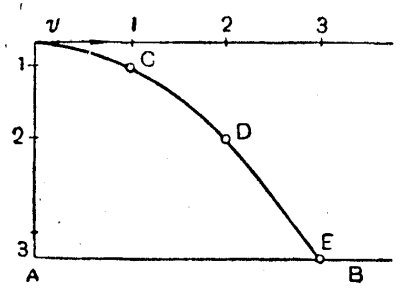


Рис. 7. Траектория движения тела, брошенного горизонтально.

Воспользуемся этим принципом для построения траектории тела, брошенного горизонтально, например, с высоты 45 *м* со скоростью $v = 20\ \frac{м}{сек}$. Примем $g = 10\ \frac{м}{сек^2}$.

На рисунке 7 линией *AB* обозначена поверхность Земли.

Если бы Земля не притягивала тело, то оно по инерции двигалось бы равномерно и, пройдя по горизонтали за 1 *сек* 20 *м*, заняло в конце первой секунды положение, отмеченное на горизонтальной прямой цифрой 1. С другой стороны, если бы оно с этой же высоты только свободно падало, то за 1 *сек* падения прошло бы 5 *м* и в конце первой секунды находилось в точке, обозначенной на вертикали цифрой 1.

Но так как тело в одно и то же время движется равномерно и прямолинейно со скоростью 20 *м/сек* и падает, то в конце первой секунды от начала движения оно будет в точке *C*. За 2 *сек* тело по инерции пройдёт 40 *м*, а падая, пройдёт 20 *м* и окажется в точке *D*. Через 3 *сек* от начала движения тело окажется в точке *E*. Соединив указанные точки плавной кривой, получим траекторию движения тела, брошенного горизонтально.

Расстояние, проходимое телом в вертикальном направлении, не зависит от начальной скорости, но расстояние, проходимое в горизонтальном направлении, тем больше, чем больше начальная скорость.

Пример. С самолёта, летящего горизонтально на высоте 2 *км* со скоростью 360 $\frac{км}{ч}$, надо сбросить груз так, чтобы он упал в намеченное место. На каком расстоянии от этого места должен быть сброшен груз? Сопротивление воздуха не учитывать; принять $g = 10\ \frac{м}{сек^2}$.

Решение. Определим, сколько времени будет падать груз с высоты $h = 2$ *км*. По формуле $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ найдём, что $t = \sqrt{\frac{2 \cdot 2000\ м}{10\ \frac{м}{сек^2}}} = 20$ *сек*. Столько же времени груз будет двигаться в горизонтальном направлении со скоростью $v = 360\ \frac{км}{ч} = 100\ \frac{м}{сек}$. Следовательно, чтобы груз упал в намеченном месте, он должен быть сброшен на расстоянии $s = 100\ \frac{м}{сек} \cdot 20\ сек = 2000\ м$ до этого места.

Упражнение 1.

1. Построить траекторию движения тела, брошенного горизонтально со скоростью 30 $\frac{м}{сек}$ с высоты 80 *м*.

Определить расстояние по горизонтали от места бросания до места падения тела на землю и скорость его в момент удара о землю. Сопротивление воздуха не учитывать. Принять $g = 10\ \frac{м}{сек^2}$.

2. С мачты парохода с высоты 10 *м* над палубой уронили мяч. Скорость парохода 18 $\frac{км}{ч}$. Насколько успеет переместиться пароход за время падения мяча? Где упадёт мяч? Какова траектория движения мяча по отношению к поверхности моря? Какова скорость мяча в момент удара о палубу?

3. На краю стола лежит кусочек мела. Мелу сообщили горизонтальный толчок по направлению, перпендикулярному к классной доске. След от удара мела о доску лежит на 20 *см* ниже поверхности стола. Расстояние доски от края стола 1 *м*. Определить начальную скорость мела.

4. С какой скоростью надо бросить тело в горизонтальном направлении с высоты 20 *м*, чтобы скорость его в момент падения на землю была 25 $\frac{м}{сек}$?

Указание. Решить эту задачу на основании закона сохранения энергии.

3. Движение тела, брошенного под углом к горизонту. Бросим какое-нибудь тело под углом к горизонту. Следя за его движением, мы заметим, что тело сначала поднимается, двигаясь по кривой, потом также по кривой падает вниз.

Если направлять струю воды под разными углами к горизонту, то можно видеть, что сначала с увеличением угла струя бьёт всё дальше и дальше. При угле в 45° к горизонту (если не учитывать

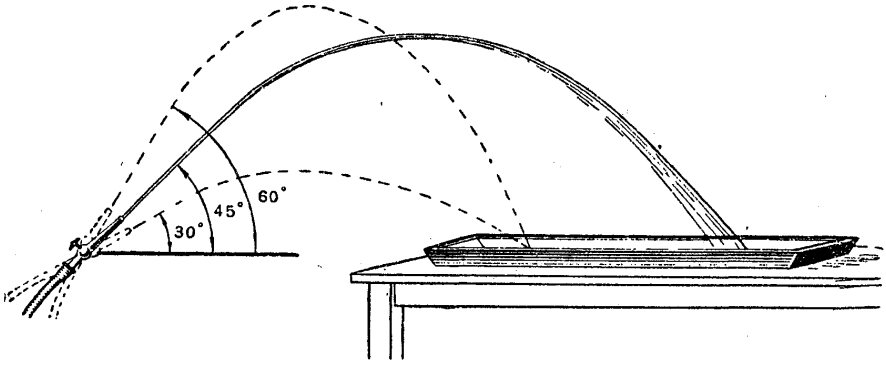


Рис. 8. Траектории, описываемые частицами воды в струе, направленной под разными углами к горизонту.

сопротивления воздуха) дальность наибольшая. При дальнейшем увеличении угла дальность уменьшается (рис. 8).

Для построения траектории движения тела, брошенного под углом к горизонту, проведём горизонтальную прямую *OA* (рис. 9) и к ней под заданным углом — прямую *OC*.

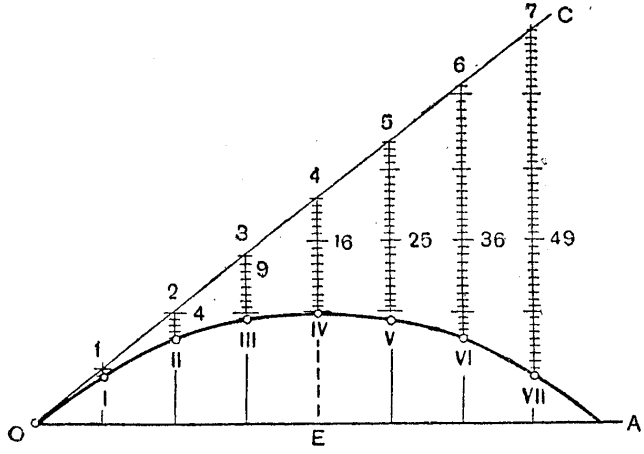


Рис. 9. Построение траектории тела, брошенного под углом к горизонту.

На линии *OC* в выбранном масштабе откладываем отрезки, численно равные путям, пройденным в направлении бросания (0—1, 1—2, 2—3, 3—4). Из точек 1, 2, 3 и т. д. опускаем перпендикуляры на *OA* и на них откладываем отрезки, численно равные путям,

проходимым свободно падающим телом в течение 1 *сек* (1—I), 2 *сек* (2—II), 3 *сек* (3—III) и т. д. Точки 0, I, II, III, IV и т. д. соединяем плавной кривой.

Траектория тела, брошенного под углом к горизонту, симметрична относительно высшей точки (на рис. 9 точка IV).

Сопротивление воздуха уменьшает как дальность полёта, так и наибольшую высоту полёта, и траектория становится несимметричной. Таковы, например, траектории снарядов и пуль. На рисунке 10 сплошная кривая показывает схематически траекторию снаряда в воздухе, а пунктирная — в безвоздушном пространстве. Насколько сопротивление воздуха изменяет дальность полёта, видно из следующего примера. При отсутствии сопротивления воздуха снаряд 76-миллиметрового орудия, выпущенный под углом 20° к горизонту, пролетел бы 24 *км*. В воздухе же этот снаряд пролетает около 7 *км*.

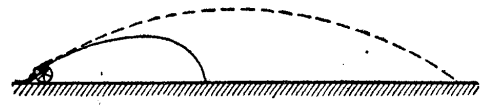


Рис. 10. Траектория тела в воздухе (сплошная кривая) и в отсутствие воздуха (пунктирная кривая).

Рассмотрим теперь, как меняется скорость тела, брошенного под углом к горизонту, в отсутствие сопротивления воздуха.

Из рисунка 11 видно, что в любой точке траектории, взятой слева от наивысшей точки *C*, например в точке *A*, сила тяжести *P*

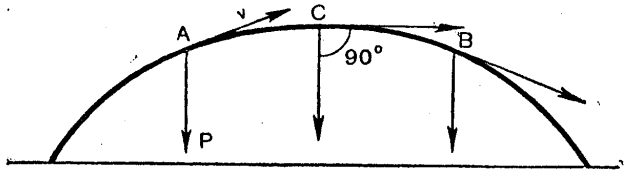


Рис. 11. При движении тела, брошенного под углом к горизонту, углы между направлениями силы тяжести и скорости во всех точках траектории различны.

направлена под тупым углом к скорости тела. На этом участке траектории тело движется вверх замедленно, сила тяжести, действующая на тело, уменьшает его скорость по величине и изменяет её по направлению.

На участке же траектории, взятом справа от точки *C*, например в точке *B*, направление силы тяжести составляет с направлением скорости острый угол. На этом участке тело движется ускоренно, сила тяжести увеличивает его скорость по величине и меняет её по направлению.

В наивысшей точке траектории *C* скорость тела направлена горизонтально, сила тяжести в этом случае образует с направлением скорости прямой угол.

Упражнение 2.

Построить траекторию движения тела, брошенного под углом 45° к горизонту со скоростью 40 $\frac{м}{сек}$, в масштабе 10 *м* в 1 *см*. Принять $g = 10\frac{м}{сек^2}$.

Определить по графику дальность полета и наибольшую высоту.

Найти по графику горизонтальную и вертикальную составляющие скорости тела в начальной точке траектории.

По найденным составляющим вычислить дальность полёта и наибольшую высоту. Сравнить с данными чертежа.

Какова должна быть скорость тела в момент падения на землю, если не учитывать сопротивление воздуха?

4. Равномерное движение по окружности. Угловая скорость. Период обращения. Одним из простейших и весьма распространённых видов криволинейного движения является равномерное движение тела по окружности. По окружности, например, движутся части маховиков, точки земной поверхности при суточном вращении Земли и т. д.

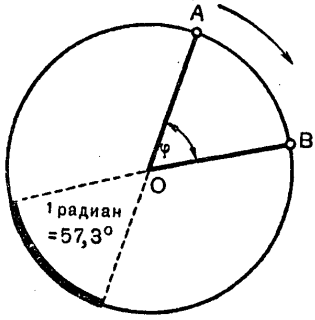


Рис. 12. К понятию угловой скорости.

Введём величины, характеризующие это движение. Обратимся к рисунку 12. Пусть при вращении тела одна из его точек за время t перешла из A в B. Радиус, соединяющий точку A с центром окружности, повернулся при этом на угол φ (греч. «фи»). Быстроту вращения точки можно характеризовать величиной отношения угла φ ко времени t, т. е. $\frac{\varphi}{t}$.

Отношение угла поворота радиуса, соединяющего движущуюся точку с центром вращения, к промежутку времени, за который происходит этот поворот, называется угловой скоростью.

Обозначая угловую скорость греческой буквой ω («омега»), можно написать:

$$\omega = \frac{\varphi}{t}.$$

Угловая скорость численно равна углу поворота в единицу времени.

При равномерном движении по окружности угловая скорость есть величина постоянная.

При вычислении угловой скорости угол поворота принято измерять в радианах. Радиан есть центральный угол, длина дуги которого равна радиусу этой дуги.

За единицу угловой скорости принимается 1 *радиан в секунду, т. е. такая угловая скорость, при которой за* 1 *сек радиус точки поворачивается на угол, равный* 1 *радиану* (на рис. 12 — угол φ).

В технике угловую скорость вращения тела измеряют числом оборотов в единицу времени (в секунду или в минуту). На-

пример, скорость шкива молотилки — 1070 $\frac{об}{мин}$. Скорость якоря электродвигателя — 1440 $\frac{об}{мин}$, скорость маховика нефтяного двигателя — 300 $\frac{об}{мин}$ и т. д.

Угловую скорость, заданную в $\frac{рад}{сек}$, можно выразить через число оборотов в секунду и, наоборот, число оборотов в секунду выразить через $\frac{рад}{сек}$. Рассмотрим это на примере.

Угловая скорость маховика 300 $\frac{об}{мин}$. Выразить её в $\frac{рад}{сек}$. Определим сначала число оборотов в секунду; оно будет равно: $\frac{300}{60} = 5$. За один оборот маховик поворачивается на угол 360°, что соответствует 2π радианам [1], а за 5 оборотов он повернётся на угол, равный 2π *рад* $\times$ 5 = 10π *рад*. Следовательно, угловая скорость маховика равна 31,4 $\frac{рад}{сек}$.

Таким образом, чтобы угловую скорость, заданную в $\frac{об}{сек}$, выразить в $\frac{рад}{сек}$, надо умножить число оборотов в секунду n на 2π:

$$\omega = 2\pi n.$$

Так как радиан есть отвлечённая мера угла, то наименованием угловой скорости будет: $\frac{1}{сек}$.

Время, в течение которого точка, двигаясь по окружности, совершает один оборот, называется периодом обращения.

Период обращения обозначается буквой T и измеряется в секундах. Если, например, за 1 *сек* точка совершает 10 оборотов, то время одного оборота, или период обращения, составляет $\frac{1}{10}$ *сек*. При n оборотах в 1 *сек* период обращения

$$T = \frac{1}{n}.$$

5. Линейная скорость. Связь между угловой и линейной скоростями. Для характеристики вращательного движения, кроме угловой скорости, вводится понятие линейной скорости.

Линейной скоростью называется скорость, с которой точка движется по окружности.

---

[1] Центральный угол, длина дуги которого равна длине окружности $2\pi R$, равен 360°. С другой стороны, длине окружности соответствует угол $\frac{2\pi R}{R} = 2\pi$ радианам. Следовательно, угол 360° содержит 2π радиан.

Формулу для величины линейной скорости можно вывести на основании следующих рассуждений.

Точка, лежащая на окружности радиуса R, за один оборот пройдёт путь, равный длине окружности $2\pi R$, за время, равное периоду T. Взяв отношение пути $2\pi R$ к времени T, мы получим скорость движения точки по окружности:

$$v = \frac{2\pi R}{T}.$$

Но $\frac{1}{T} = n$; следовательно,

$$v = 2\pi R n. \qquad (1)$$

Отсюда легко установить связь между линейной и угловой скоростями. Мы уже знаем, что угловая скорость связана с числом оборотов формулой: $\omega = 2\pi n$; поэтому на основании формулы (1) получим:

$$v = \omega R. \qquad (2)$$

Линейная скорость точки, движущейся равномерно по окружности, равна угловой скорости, умноженной на радиус окружности.

В § 1 было показано, что вектор скорости точки, движущейся по окружности, направлен по касательной. Следовательно, *линейная скорость направлена по касательной к окружности.*

Из формулы (2) видно, что линейная скорость измеряется в $\frac{см}{сек}$, $\frac{м}{сек}$ и т. д.

Пример 1. Маховик, равномерно вращаясь, делает 300 $\frac{об}{мин}$. Чему равна линейная скорость точки маховика, находящейся от оси вращения на расстоянии 1 *м*?

Вычисляем по формуле: $v = 2\pi R n$.

$$v = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 300 \cdot 1\ м}{60\ сек} = 31{,}4\ \frac{м}{сек}.$$

Пример 2. Определить угловую и линейную скорости экваториальных точек земной поверхности при суточном вращении Земли вокруг оси. Радиус Земли принять равным 6400 *км*.

Угловая скорость определится из равенства: $\omega = \frac{2\pi}{T}$, где $T = 24 \cdot 3600\ сек$.

$$\omega = \frac{2 \cdot 3{,}14}{24 \cdot 3600\ сек} \approx 0{,}00007\ \frac{1}{сек}.$$

Линейная скорость $v = \omega R$; следовательно,

$$v = 0{,}00007\ \frac{1}{сек} \times 6\,400\,000\ м \approx 450\ \frac{м}{сек}.$$

6. Центростремительное ускорение. В § 1 было показано, что всякое криволинейное движение происходит под действием силы, направленной под углом к скорости. В случае равномерного движения по окружности этот угол будет прямым. В самом деле, если, например, вращать шарик, привязанный к верёвке, то направление скорости шарика в любой момент времени перпендикулярно верёвке (рис. 13). Сила же натяжения верёвки, удерживающая шарик на окружности, направлена вдоль верёвки к центру вращения.

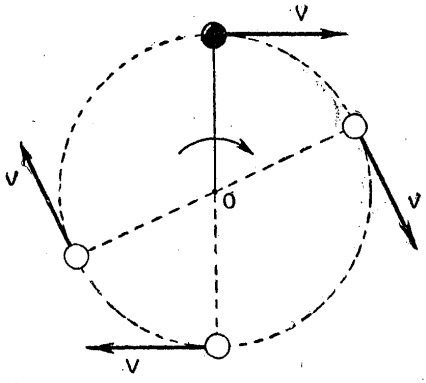


Рис. 13. При равномерном движении по окружности векторы скорости в разные моменты времени равны по величине, но различны по направлению.

Сила, удерживающая вращающееся тело на окружности и направленная к центру вращения, называется центростремительной силой.

По второму закону Ньютона эта сила будет вызывать ускорение тела в том же направлении. *Ускорение, направленное по радиусу к центру вращения, называется центростремительным ускорением.*

К вопросу о центростремительной силе мы вернёмся ещё в § 7 и 8, в данном параграфе выведем формулу для определения величины центростремительного ускорения.

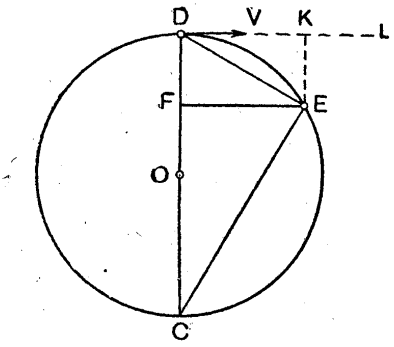


Рис. 14. К выводу формулы центростремительного ускорения.

Прежде всего заметим, что движение по окружности — сложное движение. Под действием центростремительной силы тело двигается к центру вращения и одновременно по инерции удаляется от этого центра по касательной к окружности.

Обратимся к рисунку 14. Пусть за время t тело, двигаясь равномерно со скоростью v, переместилось из D в E. Допустим, что в тот момент, когда тело находилось в точке D, на него перестала бы действовать центростремительная сила. Тогда за время t оно переместилось бы в точку K, лежащую на касательной DL. Если же в начальный момент тело оказалось бы под действием только одной центростремительной силы (не двигалось по инерции), то оно за время t, двигаясь равноускоренно, переместилось бы в точку F, лежащую на прямой DC. В результате

сложения этих двух движений за время t получается результирующее движение по дуге DE.

Возьмём промежуток времени t столь малым, чтобы дуга DE мало отличалась от хорды DE, т. е. заменим движение по дуге движением по хорде. В этом случае путь тела по хорде DE будет равен vt, т. е. $DE = vt$.

Обозначим через a искомое центростремительное ускорение. Тогда путь DF, который тело проходит за время t под действием только одной центростремительной силы, выразится известной формулой пути равноускоренного движения:

$$DF = \frac{at^2}{2}.$$

Теперь воспользуемся известной геометрической теоремой [1], на основании которой

$$(DE)^2 = DC \cdot DF. \qquad (1)$$

Поскольку $DE = vt$, $DF = \frac{at^2}{2}$, $DC = 2R$ (см. рис. 14), то из равенства (1) после простых преобразований получается формула центростремительного ускорения:

$$a = \frac{v^2}{R}. \qquad (2)$$

Величина центростремительного ускорения точки равна частному от деления квадрата линейной скорости на радиус окружности.

Центростремительное ускорение можно выразить также через угловую скорость и радиус окружности.

Мы знаем, что $v = \omega R$, где ω — угловая скорость. Если поставить это значение скорости в формулу (2), то получим:

$$a = \omega^2 R.$$

7. Центростремительная сила. Чтобы получить формулу для расчёта величины центростремительной силы, надо воспользоваться вторым законом Ньютона, который применим и к любому криволинейному движению.

Подставляя в формулу $F = ma$ значение центростремительного ускорения $a = \frac{v^2}{R}$, получим формулу центростремительной силы:

$$F = \frac{mv^2}{R}. \qquad (1)$$

Величина центростремительной силы равна произведению массы тела на квадрат линейной скорости, делённому на радиус.

[1] Перпендикуляр, опущенный из какой-либо точки окружности на диаметр, есть средняя пропорциональная величина между отрезками диаметра, а хорда, проведённая от той же точки к концу диаметра, есть средняя пропорциональная между диаметром и прилежащим отрезком.

Если дана угловая скорость тела, то центростремительную силу удобнее рассчитывать по формуле: $F = m\omega^2 R$, где $\omega^2 R$ — центростремительное ускорение.

Из формулы (1) видно, что при одной и той же скорости чем меньше радиус окружности, тем больше центростремительная сила. Так, на поворотах дороги на движущееся тело (поезд, автомобиль, велосипед) должна действовать по направлению к центру закругления тем бо́льшая сила, чем круче поворот, т. е. чем меньше радиус закругления.

Центростремительная сила зависит от линейной скорости: с увеличением скорости она увеличивается. Это хорошо известно всем конькобежцам, лыжникам и велосипедистам: чем с бо́льшей скоростью движешься, тем труднее сделать поворот. Шофёры очень хорошо знают, как опасно круто поворачивать автомобиль на большой скорости.

Прикрепим какой-нибудь грузик к динамометру и, держа за кольцо динамометра, раскрутим грузик в горизонтальной плоскости. Динамометр покажет силу, которая удерживает грузик на окружности, т. е. центростремительную силу. С изменением скорости движения меняется и величина центростремительной силы.

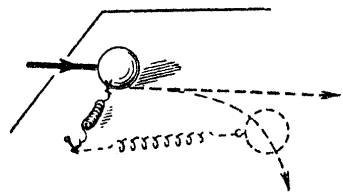


Рис. 15. Сила упругости пружины действует на шарик как центростремительная сила.

Меняя массы грузиков и всякий раз измеряя силу, действующую на грузик, можно показать зависимость величины центростремительной силы от массы тела.

Центростремительная сила не является силой какого-то особого рода. Как и всякая сила, центростремительная сила характеризует действие на данное тело других каких-нибудь тел. Центростремительной силой может быть *любая сила, удерживающая тело на криволинейной траектории,* например сила трения, сила упругости, сила тяготения.

Рассмотрим некоторые примеры. Прикрепим пружину к тяжёлому шарику так, как это показано на рисунке 15. Толчком заставим шарик двигаться в направлении, указанном стрелкой. Вначале шарик будет двигаться прямолинейно. Расстояние между ним и точкой закрепления начнёт возрастать, и пружина будет растягиваться. При этом возникнет сила упругости, действующая на шарик в направлении к точке закрепления. Эта сила вызовет ускорение движения шарика в этом же направлении и будет удерживать его на криволинейной траектории. В тот момент, когда сила упругости пружины станет равной центростремительной силе $\frac{mv^2}{R}$, шарик начнёт двигаться по окружности радиуса R.

В этом опыте сила упругости пружины является центростремительной силой.

Положим на диск какое-либо тело (рис. 16). При вращении диска вместе с ним будет вращаться и тело, удерживаясь на окружности силой трения покоя. Если увеличить скорость вращения диска, то сила трения покоя, существующая между поверхностью диска и телом, может оказаться недостаточной для удержания тела на окружности и оно вследствие инерции слетит с диска. В этом опыте центростремительной силой является сила трения покоя.

Сила притяжения F, действующая на Луну со стороны Земли (рис. 17), является центростремительной силой; она обусловливает движение Луны вокруг Земли.

8. Примеры действия центростремительной силы. В некоторых случаях центростремительная сила является равнодействующей двух сил, действующих на движущееся по окружности тело.

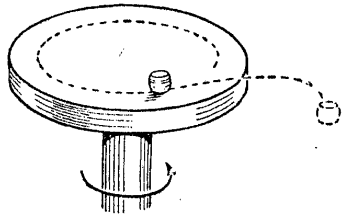


Рис. 16. При увеличении скорости вращения диска тело не удерживается на окружности и слетает с диска.

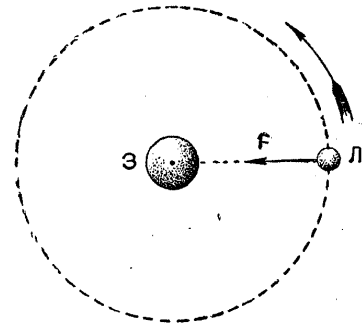


Рис. 17. Сила тяготения F, действующая на Луну со стороны Земли, является центростремительной силой.

Рассмотрим несколько таких примеров.

1. По вогнутому мосту движется автомобиль со скоростью v, масса автомобиля m, радиус кривизны моста R. Чему равна сила давления, производимого автомобилем на мост, в наинизшей его точке?

Установим прежде всего, какие силы действуют на автомобиль (рис. 18). Таких сил две: вес автомобиля и сила давления моста на автомобиль. (Силу трения в этом и во всех последующих примерах мы исключаем из рассмотрения.)

Когда автомобиль неподвижен, то эти силы, будучи равными по величине и направленными в противоположные стороны, уравновешивают друг друга.

Когда же автомобиль движется по мосту, то на него, как и на всякое тело, движущееся по окружности, действует центростремительная сила. Что является источником этой силы? Источником этой силы может быть только действие моста на автомобиль. Сила Q, с которой мост давит на движущийся автомобиль (рис. 18), должна не только уравновешивать вес автомобиля P, но и вынуждать его двигаться по окружности, создавая необходимую для этого центростремительную силу F. Сила F может быть только

равнодействующей сил P и Q, так как она является результатом взаимодействия движущегося автомобиля и моста.

Так как в положении, изображённом на рисунке 18, силы P и Q направлены по прямой в противоположные стороны, то центростремительная сила F равна их разности, т. е.

$$F = Q - P. \tag{1}$$

Из равенства (1) определится сила давления моста на автомобиль, т. е. сила Q:

$$Q = P + F. \tag{2}$$

Так как $F = \frac{mv^2}{R}$, то можно написать:

$$Q = P + \frac{mv^2}{R}. \tag{3}$$

По третьему закону Ньютона, с какой силой мост давит на автомобиль, с такой же по величине силой давит и автомобиль на мост, т. е. найденная сила Q будет равна по величине искомой силе давления движущегося автомобиля на мост.

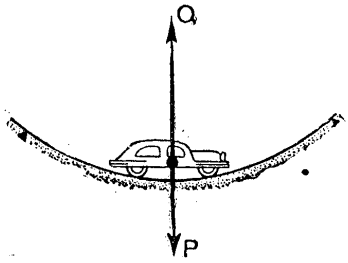


Рис. 18. P и Q — силы, действующие на автомобиль, движущийся по вогнутому мосту.

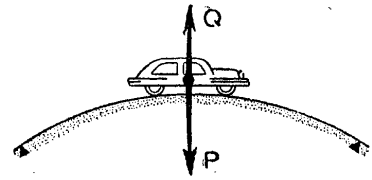


Рис. 19. P и Q — силы, действующие на автомобиль, движущийся по выпуклому мосту.

Таким образом, сила, с которой давит на вогнутый мост движущийся автомобиль (или какое угодно другое тело), больше веса автомобиля на величину центростремительной силы.

Из формулы (3) видно, что при больших скоростях движения, малом радиусе кривизны моста и значительных движущихся массах сила давления на мост может быть очень большой. Следовательно, вогнутые мосты строить нецелесообразно, так как для них необходимы опоры повышенной прочности.

2. Определим теперь силу давления, производимого движущимся автомобилем на выпуклый мост в его верхней точке. И в этом случае на автомобиль действуют две силы: сила тяжести P и сила давления моста Q (рис. 19). Равнодействующая этих сил, сила F,

вызывает при движении по окружности центростремительное ускорение, т. е. она является центростремительной силой. Центростремительная сила F направлена в сторону вогнутости моста, т. е. теперь в ту же сторону, что и сила P; величина её, как и в первом случае, равна разности сил P и Q:

$$F = P - Q.$$

Отсюда

$$Q = P - F, \quad \text{или} \quad Q = P - \frac{mv^2}{R}. \tag{4}$$

С такой же по величине силой автомобиль давит на мост. Из равенства (4) видно, что эта сила меньше веса автомобиля на величину центростремительной силы.

В разобранных случаях силы, действующие на тела, движущиеся по окружности, были направлены

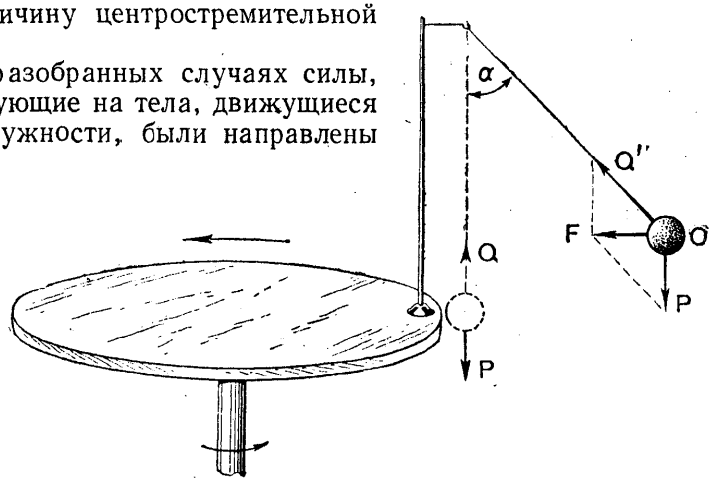


Рис. 20. На неподвижный маятник действуют две равные и противоположно направленные силы P и Q. При вращении маятника на него действуют силы P и Q', равнодействующая которых F является центростремительной силой.

по одной прямой. Рассмотрим теперь примеры, когда такие силы направлены под углом друг к другу.

3. На рисунке 20 изображён отвес, установленный на вращающемся столике. При неподвижном столике натяжение нити Q и сила тяжести P, приложенные к шарику отвеса, направлены по одной вертикальной прямой и уравновешивают друг друга.

При вращении столика отвес отклоняется от вертикали. При этом силы Q' и P, действующие на шарик, уже не уравновешиваются, так как они направлены под углом друг к другу. Величина равнодействующей F этих сил является центростремительной силой, она зависит от угла α, на который отклонился отвес. При данном угле отклонения шарик будет двигаться по окружности с центростремительным ускорением $a = \frac{v^2}{R}$, где R — расстояние между центром шарика и осью вращения.

Центростремительная сила, действующая на шарик, будет равна:

$$F = \frac{mv^2}{R}, \quad \text{или} \quad F = m\omega^2 R.$$

Из треугольника FOP можно найти зависимость между углом отклонения отвеса, угловой скоростью и радиусом окружности:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{F}{P} = \frac{m\omega^2 R}{mg} = \frac{\omega^2 R}{g}.$$

Отсюда видно, что угол отклонения отвеса увеличивается с увеличением угловой скорости.

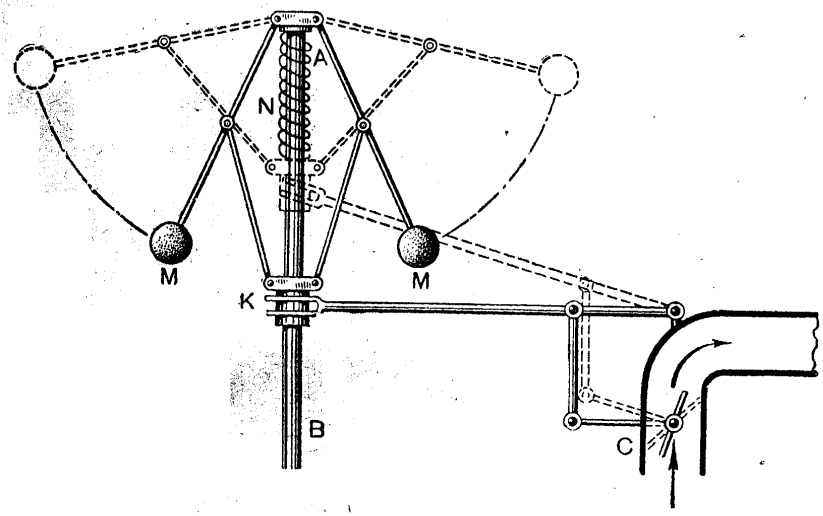


Рис. 21. Модель регулятора Уатта.

4. Рассмотренное явление используется в устройстве регулятора Уатта, прибора, служащего для установления постоянного числа оборотов машины. Его устройство показано на рисунке 21.

Вал регулятора AB получает вращение от машины. Массивные грузы M, укреплённые на шарнирах, при вращении отклоняются и поднимают муфту K, сжимая одновременно пружину N. Муфта K соединена рычагом с заслонкой C, регулирующей подачу пара в цилиндры машины. Когда число оборотов машины выше нормы, муфта K поднимается и заслонка C уменьшает доступ пара в цилиндры. При уменьшении же числа оборотов машины муфта, наоборот, опускается и заслонка C увеличивает поступление пара в машину. Всякое изменение числа оборотов вала машины влечёт за собой изменение количества пара, поступающего в цилиндр машины. Благодаря этому вал машины вращается с постоянным числом оборотов.

Подобные регуляторы в настоящее время устанавливаются в паровых машинах, в паровых турбинах и водяных двигателях.

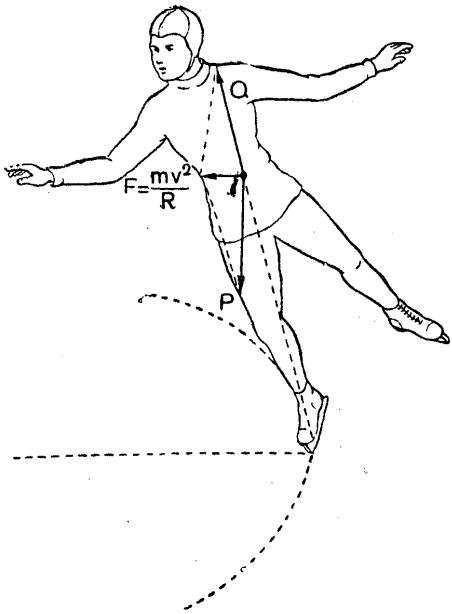


Рис. 22. На закруглениях конькобежец наклоняется к центру окружности. Сила тяжести P и сила давления Q со стороны льда дают равнодействующую F, обусловливающую центростремительное ускорение.

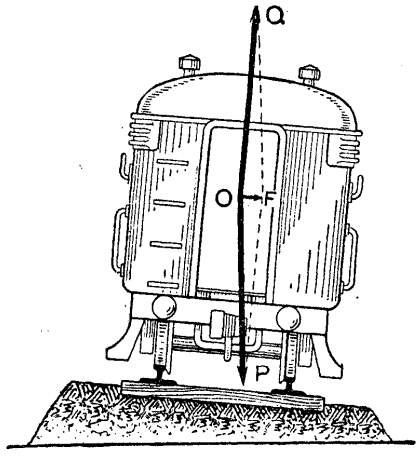


Рис. 23. Наклон железнодорожного пути на закруглении. Сила тяжести вагона P и сила давления Q на него со стороны рельсов дают равнодействующую F, обусловливающую центростремительное ускорение.

5. Рассмотрим движение конькобежца на закруглении пути.

При движении на прямолинейном участке пути сила тяжести и сила давления со стороны льда, действующие на конькобежца по одной вертикали, уравновешивают друг друга.

Движение на закруглении происходит под действием центростремительной силы. Чтобы создать эту силу, конькобежец наклоняется внутрь закругления. При этом его вес P и сила Q давления льда на него уже не уравновешивают друг друга. Равнодействующая этих сил F направлена внутрь окружности, она и является искомой центростремительной силой:

$$F = \frac{mv^2}{R}.$$

Угол наклона корпуса конькобежца к горизонтальной плоскости зависит от скорости v и радиуса закругления пути R. Конькобежцы хорошо знают, что чем больше скорость и меньше радиус закругления, тем больше надо наклонить корпус внутрь круга.

Аналогичные явления имеют место при движении на закруглении велосипедиста или бегуна. Во всех этих случаях наклон создаётся самим движущимся человеком.

6. При движении поезда на закруглениях пути наклон создаётся особым устройством пути: наружный рельс приподнимается относительно внутреннего, т. е. рельсы на закруглении наклонены в сторону центра окружности (рис. 23).

На вагон в этом случае действуют силы P и Q, равнодействующая которых F и вызывает центростремительное ускорение.

Понятно, что наклон железнодорожного пути должен быть рассчитан на некоторую среднюю скорость. Значительное превышение этой скорости вызовет сильное боковое давление на рельс, что может привести к крушению поезда.

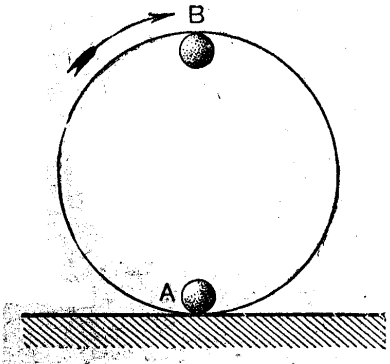


Рис. 24. К упражнению 1, § 8.

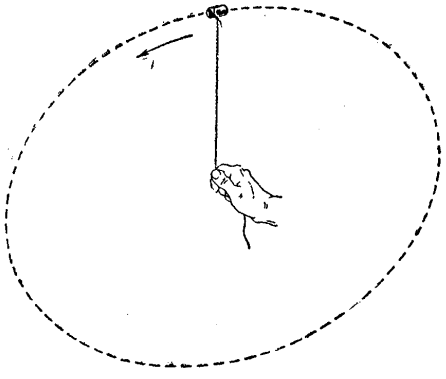


Рис. 25. К упражнению 2, § 8.

Упражнение 3.

1. Укажите направление ускорения движущегося тела в положениях A и B, показанных на рисунке 24.

2. На рисунке 25 показана рука, вращающая камень, привязанный к верёвке. Укажите, какие силы действуют на камень, на верёвку, на руку, и изобразите их векторами. Если в положении, показанном на рисунке, верёвка оборвётся, то как будет двигаться камень?

3. На рисунке 26 изображён прибор, состоящий из стержня, по которому могут скользить два шарика; масса одного в 2 раза больше массы другого. Оба шарика связаны нитью так, что центры тяжести их расположены друг от друга на расстоянии 12 *см*. Весь прибор приводится во вращение вокруг вертикальной оси. Рассчитать, на каком расстоянии от оси вращения должны быть расположены шарики, чтобы при вращении прибора они оставались на месте, не скользили по стержню.

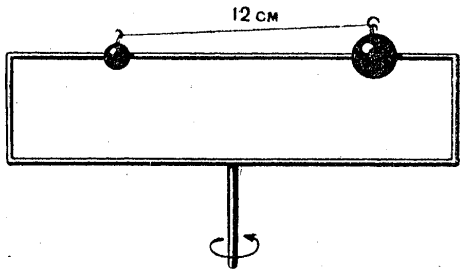


Рис. 26. К упражнению 3, § 8.

4. Если к верёвке привязать маленькое ведёрко с водой, то можно это ведёрко вращать по кругу и вода из него не выльется. Изготовьте ведёрко из жестяной банки и проделайте такой опыт. Постарайтесь объяснить его.

5. Вычислить, с какой наименьшей скоростью должен двигаться велосипедист в верхней точке «мёртвой петли» (рис. 27), чтобы не упасть вниз. Радиус петли 8 *м*. Чему равна наименьшая высота, с которой он должен начать движение, не работая педалями?

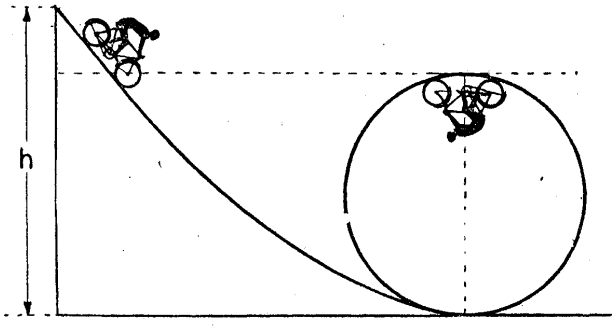


Рис. 27. К упражнению 5, § 8.

9. Третий закон Ньютона в применении к движению тел по окружности. При рассмотрении движения тела по окружности мы обращали внимание лишь на ту силу, которая действует на движущееся тело. Так, в одном из разобранных нами случаев (§ 7) на движущийся по окружности шарик действовала упругая сила растянутой (деформированной) пружины (рис. 15).

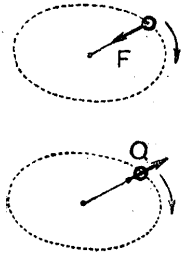


Рис. 28. Центростремительная сила F приложена к шарику, а центробежная сила Q приложена к нити, а через нее к центру вращения шарика (например, к руке).

Но согласно третьему закону Ньютона действие пружины на шарик должно вызвать равное и противоположно направленное действие шарика на пружину.

Таким образом, при движении шарика по окружности одна сила приложена к шарику (это центростремительная сила), другая сила, равная по величине центростремительной, приложена к пружине; эта сила называется центробежной.

Так как центростремительная и центробежная силы приложены к разным телам, то уравновесить друг друга они не могут. Рисунок 28 поясняет это; здесь F — центростремительная сила, она приложена к шарику; Q — центробежная сила, она приложена к нити, а через неё к центру вращения шарика.

Мы знаем, что если какое-нибудь тело действует на другое с некоторой силой, то оба они деформируются. Следовательно, в случае движения шарика по окружности деформируется не только пружина (или нить), но и шарик.

Это относится ко всем случаям движения тел по окружности. Например, при движении трамвая на закруглении деформируются рельсы, и они давят на колёса; последние в свою очередь деформируются и давят на рельсы.

Установлено, что на закруглениях пути рельсы быстрее изнашиваются, чем на прямолинейных участках. Это объясняется наличием бокового давления, которое испытывают на закруглениях рельсы со стороны колёс.

10. Центробежные механизмы. Центробежные механизмы — это общее название разнообразных приборов и аппаратов, работа которых основана на явлениях, наблюдаемых при движении тела по окружности.

К числу таких механизмов относится и рассмотренный уже нами регулятор Уатта. Рассмотрим ещё некоторые из них.

Центробежный насос. Схематическое изображение центробежного насоса дано на рисунке 29. Внутри полого корпуса *A* находится диск *C* с рёбрами (крыльчатка), который приводится в быстрое вращение двигателем при помощи ремня *E*. Насос перед запуском заполняется водой. При вращении крыльчатки приходит во вращение и вода, содержащаяся в корпусе насоса. Так как силы сцепления между частицами воды недостаточны, чтобы удержать их на круговых траекториях, то эти частицы по инерции отлетают по касательным в вертикальную трубу *B*. В корпусе, из которого крыльчатка гонит воду, создаётся пониженное давление. Под действием атмосферного давления в насос по трубе *D* подаются новые порции воды. На рисунке 29 стрелками показаны направления вращения колеса и движения частиц воды.

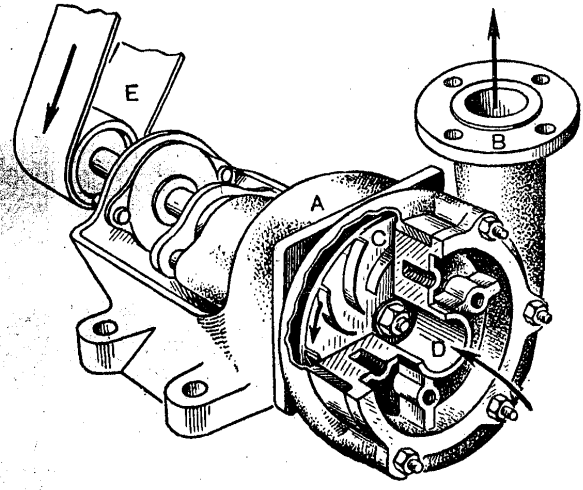


Рис. 29. Устройство центробежного насоса.

В отличие от поршневых насосов центробежные насосы являются насосами непрерывного действия. К. п. д. таких насосов значительно выше к. п. д. поршневых насосов, так как при их работе отсутствуют потери энергии, связанные с возвратно-поступательным движением поршня в цилиндре.

Центробежные насосы бывают самых разнообразных размеров — от маленьких насосов, имеющихся в системе охлаждения

автомобиля, до мощных насосов, установленных на земснарядах, которые перекачивают смесь воды и грунта, выполняя гигантскую землеройную работу.

Центробежная сушильная машина. Центробежная сушильная машина находит широкое применение в прачечных. Принцип её действия демонстрируется на приборе, изображённом на рисунке 30. Мокрое бельё закладывается во вращающийся решётчатый барабан. При большой скорости вращения сила сцепления между каплями воды и тканью (эта сила является в данном случае центростремительной) недостаточна для того, чтобы удержать капли на ткани. Они отрываются от ткани и вследствие инерции улетают через решётку из барабана. Ткань таким образом высушивается.

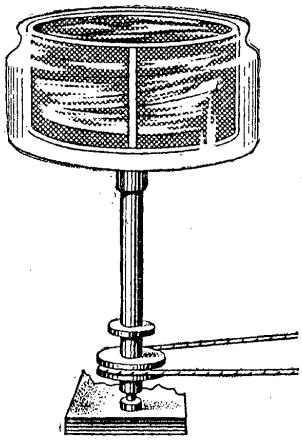


Рис. 30. Модель центробежной сушильной машины.

Силы, возникающие при вращении тел, не всегда приносят пользу. Например, при больших скоростях вращения может разорваться маховое колесо. Растянутые при вращении спицы колеса могут не удержать на своих местах части обода: когда такое растяжение превысит допустимый предел, произойдёт авария — разрыв колеса.

11. Вращательное движение твёрдых тел. Простейшие движения твёрдого тела — поступательное и вращательное. С поступательным движением мы уже ознакомились в первой части курса.

Вращательное движение твёрдых тел весьма распространено в природе и технике. Например: движение Земли вокруг своей оси, движение шкивов, маховых колёс и обтачиваемых на токарных станках деталей, движение граммофонной пластинки и т. п.

На рисунке 31 стрелками показано вращательное движение детали на токарном станке и поступательное движение резца; на рисунке 32 поступательно движется деталь, а резец (фреза) вращается.

Любое движение твёрдого тела может быть представлено как результат поступательного и вращательного движений. Особенно хорошо это видно на примере винтового движения. Болт, например, ввинчиваясь в гайку, движется поступательно и одновременно вращается. Сверло при работе (рис. 33) также одновременно вращается и движется поступательно. Колесо повозки, вращаясь вокруг оси, одновременно вместе с повозкой движется поступательно. Таких примеров можно привести сколько угодно.

Возьмём картонный диск с нарисованными на нём кружочками на разных расстояниях от центра (рис. 34а) и приведём его в бы-

строе вращение — мы увидим ряд окружностей разных радиусов (рис. 34б). Этот опыт показывает, что при вращательном движении тела различные его точки движутся по окружностям; центры этих окружностей лежат на прямой, называемой о с ь ю в р а щ е н и я. Угол поворота радиусов окружностей точек за данный промежуток времени для всех точек тела одинаков. Поэтому углом поворота радиуса окружности одной какой-нибудь точки тела за данный

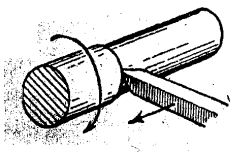


Рис. 31. Вращательное движение детали на токарном станке и поступательное движение резца.

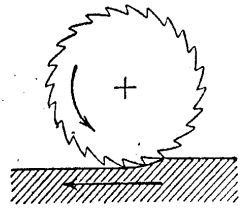


Рис. 32. Деталь движется справа налево поступательно, а резец (фреза) вращается.

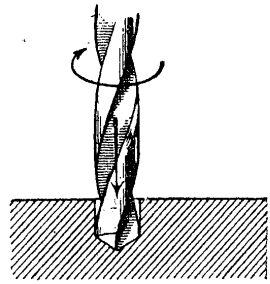


Рис. 33. Сверло при работе вращается и движется поступательно.

промежуток времени можно характеризовать движение всех точек тела, т. е. вращение тела в целом. Но угол поворота в 1 *сек* численно равен угловой скорости. Следовательно, *угловая скорость у всех точек вращающегося тела одна и та же.*

На рисунка 35 видно, что при повороте колеса на угол φ разные точки колеса: A, A_1, A_2 — описывают разные по длине дуги: AB,

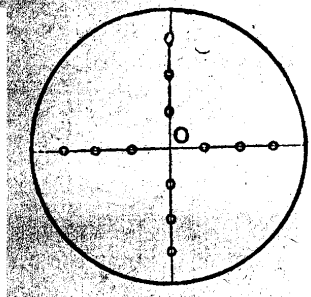


Рис. 34а. Вдоль диаметров диска нанесены небольшие кружочки.

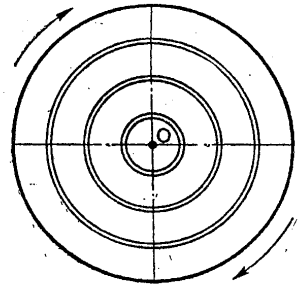


Рис. 34б. При вращении диска вместо кружочков мы видим окружности, по которым движутся эти кружочки.

A_1B_1, A_2B_2; чем точка дальше от оси вращения, тем описываемая ею дуга больше, тем больше линейная скорость. Итак, ***при вращении тела разные его точки движутся с одинаковой угловой скоростью, но с разными линейными скоростями.***

Формула, выражающая связь между угловой и линейной скоростями, была уже дана в § 5.

12. Тахометр. Угловую скорость вращающегося тела (колеса, вала, вращающихся частей машин и др.) измеряют с помощью специального прибора — т а х о м е т р а [1]. Тахометры бывают

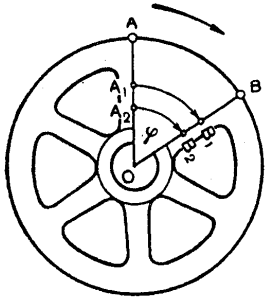


Рис. 35. При повороте колеса на угол φ точки колеса A, A_1, A_2 описывают разные по длине дуги: AB, A_1B_1, A_2B_2.

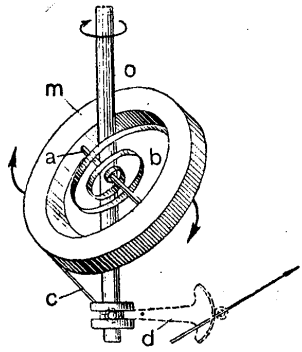


Рис. 36. Схема устройства тахометра.

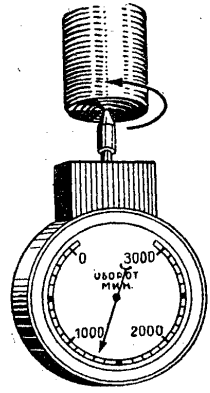


Рис. 37. Внешний вид тахометра.

разных типов. На рисунке 36 изображена схема устройства так называемого центробежного тахометра. Кольцевой груз *m*, который может поворачиваться вокруг оси *a*, удерживается в наклонном положении спиральной пружиной *b*. Ось *a* укреплена на главном валу *O*. Последний соединяется с валом, число оборотов которого нужно измерить. При вращении вала *O* кольцо *m*, стремясь расположиться в плоскости, перпендикулярной валу, сжимает пружину *b*. Кольцо будет тем ближе к этому положению, чем больше скорость вращения вала. Перемещение кольца *m* с помощью тяги *c* передаётся специальному устройству, соединённому с сектором *d*, который и вращает стрелку указателя скорости. Каждому числу оборотов будет соответствовать определённое положение кольца *m*, а следовательно, и положение стрелки на шкале. На рисунке 37 показан внешний вид тахометра.

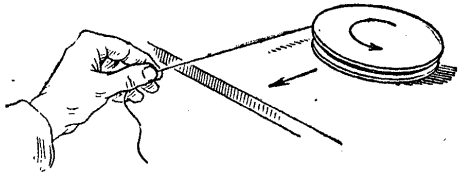


Рис. 38. Потянув за нить, мы заставим диск не только вращаться, но и перемещаться.

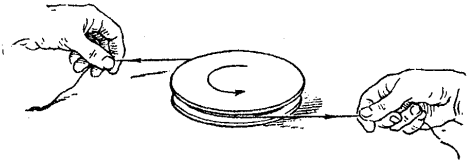


Рис. 39. При действии двух равных, параллельных и противоположно направленных сил (пара сил) диск вращается, не перемещаясь.

[1] Т а х о м е т р — от греч. слов: т а х е о с — быстрый, скорый; м е т р е о — мерю.

13. Силы, действующие на твёрдое тело, вращающееся вокруг оси. Проделаем следующий опыт. Намотаем на диск нить и потянем её (рис. 38). На диск будут действовать две разные силы: сила натяжения нити и сила трения диска о стол. Под действием этих сил диск будет вращаться и одновременно перемещаться.

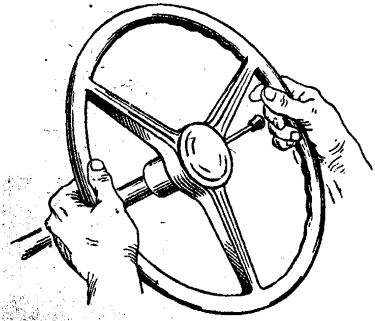


Рис. 40. Действие рук водителя на рулевое колесо создаёт пару сил.

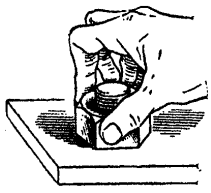


Рис. 41. Пальцы, завинчивающие гайку, создают пару сил.

Если же намотать на диск две нити так, как показано на рисунке 39, и потянуть за нити в противоположные стороны, приложив равные силы, то диск будет только вращаться.

Две равные, параллельные и противоположно направленные силы называются парой сил.

Итак, тело под действием пары сил только вращается. Вращение тела под действием пары сил широко применяется в практике. Например, действие рук водителя на рулевое колесо (рис. 40) создаёт пару сил, точно так же пару сил создают пальцы, завинчивающие гайку (рис. 41).

Упражнение 4.

1. Радиус окружности, по которой движется конец секундной стрелки, 0,8 *см*, минутной — 2 *см*, часовой — 1,5 *см*. Найти линейные и угловые скорости стрелок.

2. Ведущее колесо паровоза диаметром 1,6 *м* делает 120 $\frac{об}{мин}$. С какой скоростью движется паровоз?

3. Найти линейную и угловую скорости точки земной поверхности на широте Москвы при суточном вращении Земли вокруг оси. Считать радиус Земли равным 6400 *км*.

14. Передача вращения от двигателя к машине-орудию. Машины разделяются на двигатели и машины-орудия. Двигатели — это, например, паровая машина, паровая турбина, гидротурбина, электродвигатель и др. К машинам-орудиям относятся станки и машины, вырабатывающие различного рода изделия, например токарный станок, ткацкий станок, прядильная машина и др.

Для работы станка необходимо, чтобы вращение от вала двигателя передавалось на вал станка. Такая передача движения осуществляется различными способами. Чаще всего для этого

применяются следующие три способа передач: ремённая, фрикционная и зубчатая.

Мы рассмотрим наиболее простой случай этих передач, когда валы двигателя и станка параллельны.

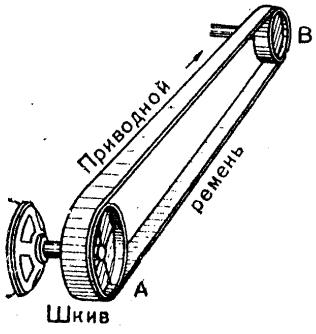


Рис. 42а. Ремённая передача: *A* — ведущий шкив; *B* — ведомый шкив. Оба шкива вращаются в одну сторону.

15. Ремённая передача. При ремённой передаче два колеса-шкива, укреплённые на разных валах, охватываются «бесконечным» приводным ремнём. Шкив *A* на валу двигателя называется ведущим, а шкив *B* на валу станка — ведомым (рис. 42а). Если диаметры шкивов неодинаковы, то, так как скорости на окружностях того и другого шкива при отсутствии скольжения равны, числа их оборотов будут различны.

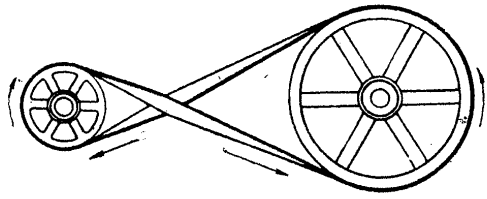


Рис. 42б. При скрещённых ремнях шкивы вращаются в противоположные стороны.

Пусть D_1 — диаметр ведущего шкива и он делает n_1 оборотов в секунду, а D_2 — диаметр ведомого шкива и n_2 — число его оборотов, v — скорость на окружностях обоих шкивов.

Тогда

$$v = \pi D_1 n_1 \quad \text{и} \quad v = \pi D_2 n_2.$$

Отсюда

$$n_1 = \frac{v}{\pi D_1} \tag{1}$$

и

$$n_2 = \frac{v}{\pi D_2}. \tag{2}$$

Разделив равенство (2) на (1), получим:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{D_1}{D_2}. \tag{3}$$

Числа оборотов шкивов в единицу времени обратно пропорциональны диаметрам шкивов. Отношение $\frac{n_2}{n_1}$ *называется передаточным числом.*

Из равенства (3) следует, что *число оборотов вала станка тем больше, чем меньше диаметр его шкива.*

Ведомый шкив приводится в движение благодаря силе трения между ремнём и шкивом. Ремённая передача работает хоро-

шо, если отсутствует скольжение (буксование) ремня по ободу шкива. Скольжение в основном зависит от натяжения ремня и от угла обхвата. Углом обхвата называется центральный угол, стягивающий дугу, на которой лежит ремень на шкиве. Чем больше передаточное число, тем меньше угол обхвата ведомого шкива и тем больше скольжение ремня о шкив. В практике считается невыгодной передача с передаточным числом, большим 5 или меньшим $^1/_5$. Роль трения в случае ремённой передачи иллюстрируется следующим опытом.

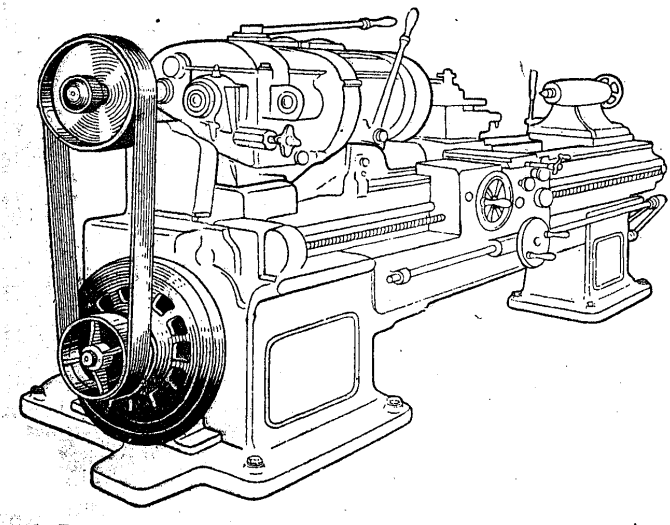


Рис. 43. Ремённая передача от электродвигателя на вал токарного станка (на рисунке электродвигатель и шкив выделены).

Перекинем верёвку через круглую и гладкую перекладину. На одном конце подвесим груз, а к другому прикрепим динамометр. Для удержания груза нам потребуется сила, немного меньшая веса груза (на величину силы трения между верёвкой и перекладиной). Обернув один раз верёвку вокруг перекладины, мы увеличим длину дуги, охватываемой верёвкой. Сила, необходимая для удержания груза в этом случае, окажется намного меньше веса груза.

Оба шкива на рисунке 42а вращаются в одну сторону по часовой стрелке. Ремённой передачей можно осуществить вращение ведомого шкива в сторону, противоположную ведущему. Для этого достаточно скрестить ремень, как показано на рисунке 42б. На рисунке 43 показана ремённая передача от электродвигателя на вал токарного станка.

16. Фрикционная передача. В случае фрикционной передачи два колеса прижаты друг к другу с некоторой силой (рис. 44а). При вращении одного колеса, например, по часовой стрелке другое колесо благодаря трению приходит тоже во вращение и движется против часовой стрелки. Такая передача имеется, например,

в швейной машине между колесом и шпулькомоталкой (рис. 44б), между тахометром и валом двигателя при измерении числа оборотов.

Вообще фрикционная передача применяется при небольших мощностях. Как известно, при одной и той же скорости мощность пропорциональна величине действующей силы. Сила же, действующая на ведомое фрикционное колесо, зависит от силы трения между обоими колёсами. Но сила трения зависит от силы давления.

Следовательно, при большой мощности оба колеса должны быть прижаты друг к другу с очень большой силой, вследствие чего вал, на котором насажено колесо, может изогнуться.

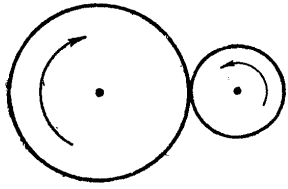


Рис. 44а. Схема фрикционной передачи.

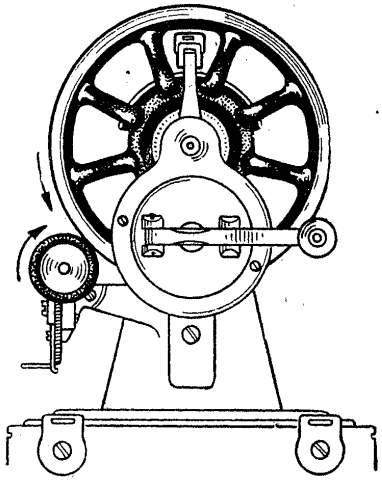


Рис. 44б. Фрикционная передача между колесом швейной машины и шпулькомоталкой.

17. Зубчатая передача. Передача зубчатыми колёсами, или ш е с т е р н я м и, находит самое широкое применение в технике. Так, при помощи зубчатых колёс осуществляется передача от двигателя к ведущим колёсам в автомобиле, тракторе и трамвае. При помощи зубчатых колёс передаётся движение от двигателя к гребному винту парохода. Зубчатые колёса применяются во многих станках для передачи движения от двигателя к станку и т. д. На рисунке 45 изображено применение зубчатых колёс в ручной лебёдке.

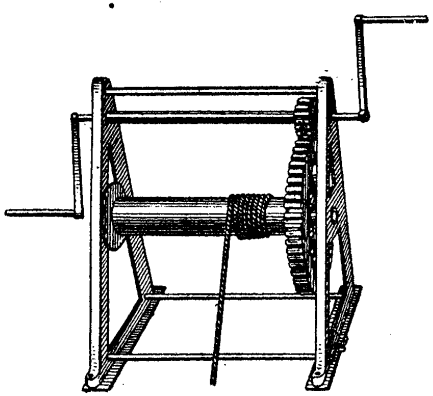


Рис. 45. Лебёдка.

С помощью шестерён можно вращательное движение преобразовать в поступательное, как это показано на рисунке 46. На этом рисунке изображена

упрощённая схема одного из наиболее употребительных механизмов строгального станка. Движение от шкива D (который приводится во вращение ремнём) передаётся при помощи валов и системы шестерён, сидящих на этих валах, зубчатой рейке R. Зубчатая рейка движется поступательно в направлении, указанном на рисунке оперённой стрелкой. Вместе с ней дви-

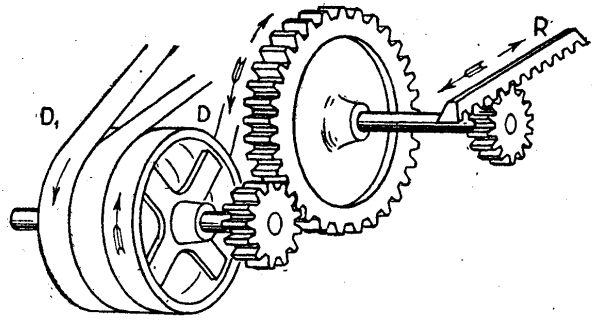


Рис. 46. Упрощённая схема передаточного механизма для сообщения движения столу продольно-строгального станка.

жется и стол станка (не изображён на рисунке), с которым скреплена рейка. Когда рейка дойдёт до конца, особым приспособлением перекрещённый ремень переводится на шкив D_1. Рейка при этом получит обратный ход (холостой) в направлении, обозначенном простой стрелкой.

Число оборотов ведомого колеса зависит от числа оборотов ведущего и числа зубьев на обоих колёсах.

Пусть одна шестерня имеет z_1 зубьев и делает n_1 оборотов в секунду, другая же, сцепленная с ней шестерня имеет z_2 зубьев и делает n_2 оборотов (рис. 47).

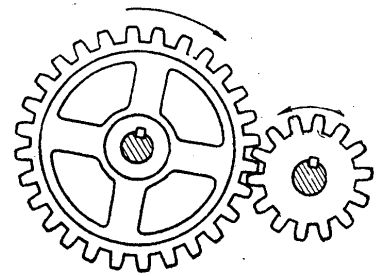


Рис. 47. К выводу соотношения между числом оборотов и числом зубьев сцепленных шестерён.

У первой шестерни за 1 секунду через точку сцепления пройдёт $z_1 n_1$ зубьев, а у второй шестерни — $z_2 n_2$. Так как числа прошедших зубьев на обеих шестернях равны, то

$$z_1 n_1 = z_2 n_2,$$

откуда

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1},$$

т. е. *число оборотов в единицу времени каждой из сцепленных шестерён обратно пропорционально числу зубьев.*

Чтобы получить на станке такое же направление вращения, как на ведущем колесе, применяется промежуточная шестерня.

Для получения нужных скоростей в различных станках применяются коробки скоростей, а в автомобилях и тракторах — коробки передач. Передача в них осуществляется зубчатыми колёсами.

На рисунке 48 изображено устройство коробки передач, а на рисунке 49 схематически показаны три передачи в автомобиле. Здесь *A* — ведущий, *B* — ведомый и *C* — промежуточный валы.

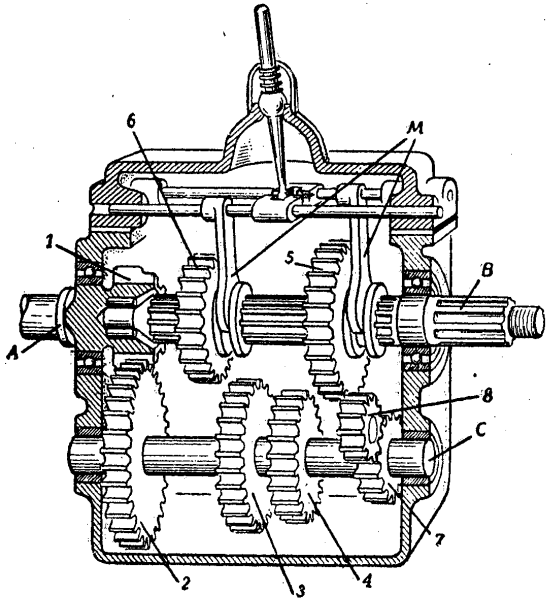


Рис. 48. Схема устройства коробки передач.

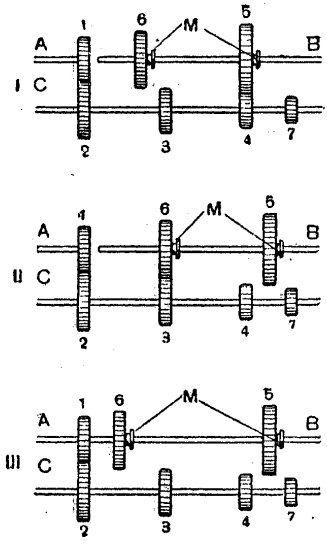


Рис. 49. Схема включения шестерён в коробке передач автомобиля.

Особым механизмом можно разъединять валы *A* и *B*. На ведущем валу *A* насажена шестерня *1* (на рис. 48 изображена только задняя половина этой шестерни). На промежуточном валу *C* укреплены шестерни *2, 3, 4* и *7*, и на ведомом валу *B* установлены скользящие шестерни *5* и *6* (каретки).

Шестерни *5* и *6*, вращающиеся вместе с валом *B*, могут перемещаться вдоль него с помощью кольцевых проточек *M* (рис. 49), в которые входят специальные вилки (они обозначены на рисунке 48 буквой *M*), служащие для передвижения шестерён. Шестерня *1* всегда сцеплена с шестернёй *2*. Шестерня *7* и сцепленная с ней шестерня *8* (рис. 48) служат для получения заднего хода.

I передача. Шестерня *5* сцеплена с шестернёй *4*. Валы *B* и *A* прямого сцепления не имеют. Ведомый вал *B* вращается с наимень-

шей скоростью при данном числе оборотов двигателя. Первая передача даёт наибольшее тяговое усилие; она применяется при трогании автомобиля с места.

II передача. Шестерня *6* сцеплена с шестернёй *3*; шестерня *5* возвращается на прежнее место. Валы *B* и *A* прямого сцепления не имеют. Скорость вращения вала *B* увеличивается. Вторая передача используется для разгона автомобиля и для преодоления сопротивлений средней трудности.

III передача. Валы *A* и *B* соединены непосредственно. Шестерни *5* и *6* не сцеплены с шестернями промежуточного вала *C*. Ведомый вал делает столько же оборотов, сколько и ведущий. Промежуточный вал *C* вращается вхолостую. При этой передаче скорость движения автомобиля может быть наибольшей. III передача используется во всех случаях движения автомобиля, когда не требуется преодолевать повышенных сопротивлений.

Задний ход автомобиля осуществляется с помощью особой шестерни *8*, сидящей на короткой оси (показана на рис. 48). Эта шестерня всегда сцеплена с шестернёй *7*, расположенной на промежуточном валу *C*. Задний ход необходим для маневрирования автомобиля (разворота на ограниченных по ширине площадках, при тупиковом въезде, движении назад и др.). Передачи переключаются с помощью особого механизма, изображенного в верхней части рисунка 48.

Сцепление служит для временного отключения силовой передачи автомобиля от вала двигателя, что необходимо при переключении шестерён в коробке передач и торможении автомобиля. Кроме того, сцепление даёт возможность плавного трогания автомобиля с места.

Упражнение 5.

1. Два вала соединены бесконечным ремнем. Ведущий вал делает 150 $\frac{об}{мин}$. На ведомом валу, который должен давать 375 $\frac{об}{мин}$, насажен шкив с диаметром 250 *мм*. Какого диаметра должен быть шкив на ведущем валу?

2. Ведущее колесо имеет 20 зубьев и делает 200 $\frac{об}{мин}$. Сколько зубьев имеет ведомое колесо, если передаточное число равно $\frac{1}{4}$? Чему равно число его оборотов в минуту?

3. Маховик паровой машины делает 225 оборотов в 1 минуту при диаметре 1200 *мм*. Окружное усилие составляет 300 *кГ*. Определить мощность этой машины.

4. Определить окружное усилие на шкиве электродвигателя, диаметр которого 500 *мм*; мощность двигателя 60 *л. с.*; угловая скорость шкива 975 $\frac{об}{мин}$.

ГЛАВА II

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

18. Периодическое движение. Среди разнообразных механических движений, совершающихся в природе и технике, встречаются такие, которые повторяются через равные промежутки времени. Движения такого рода называются периодическими. Промежуток времени, через который движение повторяется, называется периодом.

В § 11 мы уже рассмотрели один из видов периодического движения — равномерное вращение тела. В этом движении при каждом новом обороте каждая точка тела проходит одни и те же положения, причём в такой же последовательности и с теми же скоростями.

Познакомимся теперь с таким периодическим движением, при котором тело перемещается около своего наиболее устойчивого положения равновесия, отклоняясь от него то в одну, то в другую сторону. Такое движение называется периодическим колебанием. Примеры периодического колебания: движение маятника часов, дрожание звучащей струны, колебание качелей и т. д.

Несмотря на большое разнообразие видов периодического движения, для характеристики его вводятся некоторые общие величины. Мы введём их при рассмотрении колебаний пружинного и нитяного маятников. Вместе с тем установим и общие законы колебаний.

19. Гармоническое (простое) колебание. Рассмотрим колебание пружинного маятника, изображённого на рисунке 50. Он состоит из массивного шара, просверлённого по диаметру и насаженного на горизонтальный стержень. Вдоль стержня шар может скользить с ничтожным трением, которое мы не будем учитывать. На стержень надета стальная пружина, один конец которой прикреплён к концу стержня, а другой — к шару.

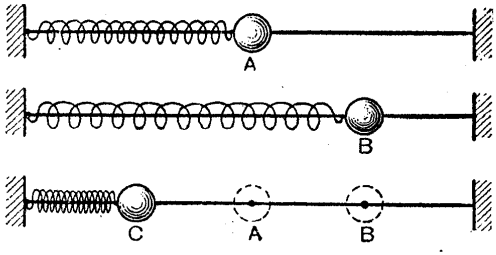


Рис. 50. Колебания груза на пружине.

В состоянии равновесия (покоя) шар находится в положении A. Если оттянуть шар вправо в положение B и затем отпустить его, то он будет совершать колебания около положения равновесия.

Какова причина этих колебаний? Отклоняя шар вправо, мы растягиваем пружину, при этом возникает сила упругости, стремящаяся вернуть пружину в положение равновесия. Под действием этой силы шар будет двигаться ускоренно. Достигнув положения равновесия, шар не остановится, хотя в этом положении на него не будет действовать сила (пружина не растянута); двигаясь по инерции, он пройдёт положение равновесия и начнёт сжимать пружину. Возникшая сила упругости будет препятствовать сжатию пружины, вследствие чего шар, достигнув некоторого положения C, остановится. Затем под действием силы упругости сжатой пружины шар будет ускоренно двигаться вправо; по инерции он опять перейдёт положение равновесия и снова окажется в B, совершив таким образом одно полное колебание. Дальше всё будет повторяться.

Итак, *причинами колебаний тяжелого шара на пружине являются сила упругости, возникающая при растяжении и сжатии пружины, и инерция шара.*

Измерения показывают, что при увеличении смещения колеблющегося тела сила упругости пружины возрастает пропорционально смещению. Значит, если сместить шар на расстояние x от положения равновесия, то величина силы F, возвращающей его в это положение, определится из равенства:

$$F = kx, \qquad (1)$$

где k — *коэффициент пропорциональности — постоянная для данной пружины величина, численно равная силе, которая растягивает пружину на единицу длины.*

Заметим, что сила F всегда направлена к положению равновесия, смещение же x отсчитывается от положения равновесия, т. е. направлено в сторону, противоположную силе. Чтобы отразить это в формуле, надо правую часть равенства (1) взять со знаком минус:

$$F = -kx. \qquad (2)$$

Периодические колебания, которые совершаются под действием силы, пропорциональной смещению и направленной к положению равновесия, называются гармоническими (или простыми) колебаниями.

Согласно второму закону Ньютона $F = ma$, где a — ускорение движения тела под действием силы F. Если в формулу (2), определяющую гармоническое колебание, подставить вместо F произведение ma, то получим: $ma = -kx$, откуда

$$a = -\frac{k}{m}x.$$

Полученное выражение позволяет дать ещё другое определение гармонического колебания:

При гармоническом колебании ускорение всегда прямо пропорционально величине смещения и противоположно ему направлено.

Упругие колебания, с которыми мы познакомились на примере пружинного маятника, представляют собой чрезвычайно распространённый и важный вид колебаний. К числу их относятся, например, колебания частей машин под действием нагрузок, строительных балок, рессор; к ним же относятся звуковые колебания.

20. Амплитуда, частота и период колебания. Введём теперь некоторые величины, характеризующие гармоническое колебание.

Наибольшее смещение колеблющейся точки от положения равновесия называется амплитудой колебаний (A). На рисунке 50 $AB = AC = A$.

Число колебаний, совершённых за 1 сек, называется частотой гармонического колебания.

Время, в течение которого совершается одно полное колебание, называется периодом.

За единицу частоты в физике принят г е р ц [1] (в честь немецкого учёного Герца, открывшего электромагнитные волны). Герц — это такая частота, при которой совершается одно колебание в секунду.

1 килогерц (*кгц*) = 1000 *гц*.

1 мегагерц (*Мгц*) = 1 000 000 *гц* = 1000 *кгц*[2].

Установим соотношение между периодом колебаний и частотой. Пусть тело совершает за 1 секунду 10 колебаний (частота колебаний равна 10 *гц*). Время, за которое совершается одно колебание, будет равно $\frac{1}{10}$ *сек*. Это и будет период данного колебания.

Вообще, если обозначить продолжительность периода через T, а частоту колебаний через f, то можно написать, что

$$f = \frac{1}{T}, \quad \text{или} \quad T = \frac{1}{f}.$$

Мы видим, что связь между частотой и периодом колебаний такая же, что и между числом оборотов и периодом обращения в случае равномерного движения по окружности (см. § 4).

Упражнение 6.

1. Опишите движение колеблющегося шара на горизонтально расположенной пружине (рис. 50), заполнив следующую таблицу:

№ п/п	Движение тела	Как меняется величина силы, движущей шар	Как меняется величина скорости движения шара	Как меняется величина ускорения движения шара
1	От A до B			
2	» B » A			
3	» A » C			
4	» C » A			

[1] В технике эту единицу иногда называют ц и к л о м.

[2] Приставка м е г а означает миллион, к и л о — тысяча.

2. Как направлено ускорение шара в положениях B и C?

3. В каких положениях скорость колеблющегося шара на пружине наибольшая? В каких наименьшая? Этот же вопрос решить относительно ускорения.

21. Колебания под действием силы тяжести. В § 19 было рассмотрено колебание пружинного маятника, но маятником может быть также любое тело, подвешенное так, что его центр тяжести находится ниже точки подвеса. Очень удобным для многих наших опытов маятником может быть металлический шарик, подвешенный на нити.

Выведем такой маятник из положения равновесия A (рис. 51) и отпустим его — он будет колебаться. Рассмотрим причину этих колебаний.

Когда маятник покоится в положении равновесия, сила тяжести, действующая на тело, уравновешена натяжением нити. В отклонённом же положении B сила тяжести P и сила натяжения нити Q действуют на тело под углом друг к другу.

Равнодействующей этих двух сил будет сила P_1. Из рисунка 51 видно, что сила P_1 всегда направлена к положению равновесия; величина её будет тем больше, чем больше отклонён маятник от положения равновесия. Это легко проверить, построив параллелограмм сил для нескольких положений маятника. Сила P_1 возвращает маятник к положению равновесия, обусловливая его колебания.

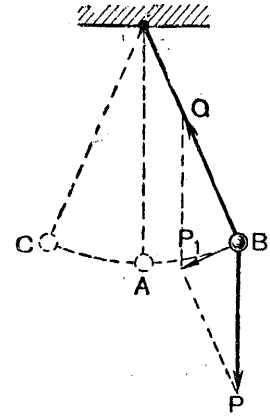


Рис. 51. Сила P_1, возвращающая маятник к положению равновесия, является равнодействующей сил P и Q.

Когда маятник движется от положения равновесия вправо, сила P_1 замедляет его движение тем сильнее, чем дальше он отклоняется. Когда же маятник начинает обратное движение к положению равновесия, сила P_1 начинает играть роль ускоряющей силы.

Маятник не остановится в положении равновесия, а по инерции будет отклоняться влево. При этом на него начнёт действовать сила P_1, растущая с увеличением отклонения маятника и направленная также к положению равновесия. Движение маятника будет замедляться; в точке C он остановится и затем снова начнёт двигаться ускоренно вправо; по инерции опять пройдёт положение равновесия A и вернётся в B, совершив, таким образом, одно полное колебание. Дальше всё будет повторяться.

Мы видели, что величина силы, возвращающей маятник к положению равновесия, зависит от угла отклонения маятника от положения равновесия. Установим эту зависимость математически.

Допустим, что смещение маятника x от положения равновесия (рис. 52) столь незначительно, что дуга, описываемая маятником при движении, практически может быть принята за

прямую линию. Начертим параллелограмм сил для положения груза в точке B.

Из рисунка 52 видно, что $P_1 = P \sin \alpha$ (1), где α — угол отклонения маятника от положения равновесия.

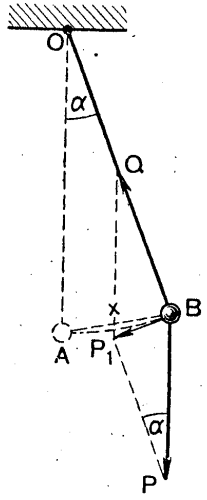


Рис. 52. К выводу формулы математического маятника.

Обозначим длину маятника через l, тогда $OB = OA = l$. Если угол α мал, то для треугольника AOB можно написать:

$$\frac{x}{l} = \sin \alpha.$$

Подставляя это значение для $\sin\alpha$ в равенство (1), получим:

$$P_1 = \frac{P}{l} x.$$

Так как P и l не изменяются, а сила P_1 по направлению всегда противоположна смещению, то можно написать:

$$P_1 = -kx, \quad \text{где} \quad k = \frac{P}{l}.$$

Отсюда видно, что *маятник колеблется под действием силы, пропорциональной смещению маятника и направленной к положению его равновесия.*

Но в этом состоит условие осуществления гармонических колебаний. Таким образом, ***при малых амплитудах колебания маятника, под действием силы тяжести являются гармоническими, или простыми, колебаниями.***

Упражнение 7.

1. Опишите движение маятника (рис. 51), заполнив следующую таблицу:

№ п. п	Движения маятника	Как меняется величина силы, движущей маятник	Как меняется величина скорости движения маятника	Как меняется величина ускорения движения маятника
1	От B до A			
2	» A » C			
3	» C » A			
4	» A » B			

Как направлено ускорение движения маятника в точках B и C?

В каких положениях маятника скорость его движения наибольшая? В каких наименьшая?

В каких положениях маятника ускорение его движения наибольшее?

2. Под действием какой по величине силы маятник весом 100 *Г* при отклонении его от положения равновесия на 45° начинает возвращаться к положению равновесия?

3. Период колебания зубила пневматического молотка равен 0,02 *сек*. Чему равна частота колебаний? Колебания зубила считать гармоническими.

4. При движении поезда колесо кривошипно-шатунного механизма делает 1200 оборотов за 5 минут. Определить частоту колебаний поршня в цилиндре паровоза, считая их гармоническими.

22. Законы колебания математического маятника. Количественные соотношения, характеризующие колебательное движение, проще всего установить для так называемого математического маятника.

Математическим маятником называют материальную точку, подвешенную на тонкой нерастяжимой и невесомой нити. Естественно, что на практике мы можем только с той или иной степенью точности приближаться к этому идеальному случаю. Реальной моделью математического маятника в наших опытах служит небольшой металлический шарик, подвешенный на тонкой упругой нити. Размеры шарика должны быть малы сравнительно с длиной нити. Это даёт возможность считать, что вся его масса сосредоточена в одной точке, в центре тяжести шарика.

Гюйгенс Христиан (1629—1695)—великий голландский физик и математик. Он впервые решил ряд важнейших задач механики, открыл закон колебаний маятника, установил формулу центростремительной силы. Гюйгенсу принадлежит изобретение маятниковых часов (1657). Он развил теорию световых явлений, которая не потеряла своего значения и в настоящее время.

Подвесим к стойке один из таких маятников длиной около 1 *м* и, отведя его от положения равновесия на небольшой угол, определим, за какое время он сделает, например, 50 колебаний.

Уменьшим угол отклонения (начальную амплитуду) и снова определим время, в течение которого шарик сделает 50 колебаний.

Оказывается, что и при уменьшенной амплитуде шарику понадобилось для 50 колебаний то же время, что и при большей амплитуде. Меняя в небольших пределах амплитуду колебаний маятника, можно установить, что *период колебания маятника при небольших амплитудах не зависит от амплитуды колебания.*

Это свойство маятника, открытое впервые Галилеем, называется изохронностью [1]. Оно, как мы увидим дальше (§ 27), дало возможность применить маятник в часах.

Подвесим к стойке на длинных нитях два одинаковых шарика [2], сделанных из разных материалов, например стальной и свинцовый, так, чтобы длины полученных маятников были одинаковы.

Отклоним оба маятника от положения равновесия на один и тот же угол. Они колеблются синхронно, т. е. периоды колебания их одинаковы, хотя массы маятников разные. Меняя как угодно массы маятников, можно убедиться, что *период колебания не зависит от массы маятника.*

Проделаем ещё один опыт, подвесив к стойке несколько одинаковых шариков на нитях разной длины. Приведя в колебание маятники, заметим, что периоды колебаний их будут различны: чем меньше длина маятника, тем меньше период его колебаний.

Голландский учёный Гюйгенс, исследуя законы колебания маятника, установил, ***что период колебания математического маятника прямо пропорционален корню квадратному из длины маятника и обратно пропорционален корню квадратному из ускорения силы тяжести:***

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

где l — длина маятника, g — ускорение силы тяжести.

Маятник — наиболее простой, удобный и точный прибор для определения ускорения силы тяжести.

Наличие в каком-нибудь месте Земли залежей ископаемых, отличающихся по плотности от окружающих их пород, сказывается на изменении величины ускорения g в этом месте. Действительно, ускорение g обусловлено силой тяготения, а последняя будет тем больше, чем больше притягивающая масса Земли. На этом основано широкое использование маятника в приборах, применяемых в геологических разведках. По измерению периода колебания маятника T в данном месте вычисляют величину g. Если она оказывается, например, больше нормальной, то, значит, в этом месте сосредоточены породы большей плотности и, наоборот, в местах, где залегают менее плотные породы, ускорение g оказывается меньше нормального.

Упражнение 8.

1. Найти длину математического маятника, период колебания которого на широте Москвы равен 1 *сек* $\left(g = 981{,}56\ \frac{см}{сек^2}\right)$.

---

[1] Изохронность — от греч.: изос — одинаковый, хронос — время.

[2] Одинаковые по размеру шарики при движении будут испытывать одинаковое сопротивление воздуха.

2. Чему должно быть равно ускорение силы тяжести, чтобы маятник длиной 1 *м* колебался с периодом в 2 *сек*?

3. Определить длину секундного маятника на Луне $\left(g_Л = 160\ \frac{см}{сек^2}\right)$, на Марсе $\left(g_М = 360\ \frac{см}{сек^2}\right)$.

23. Графическая запись колебательного движения. Графическая запись движения широко применяется при изучении быстро происходящих колебательных процессов, так как даёт возможность изучить каждую стадию таких процессов.

Наиболее простой и наглядной формой записи является запись колебаний маятника песком на бумаге или на фанере при помощи прибора, изображённого на рисунке 53а.

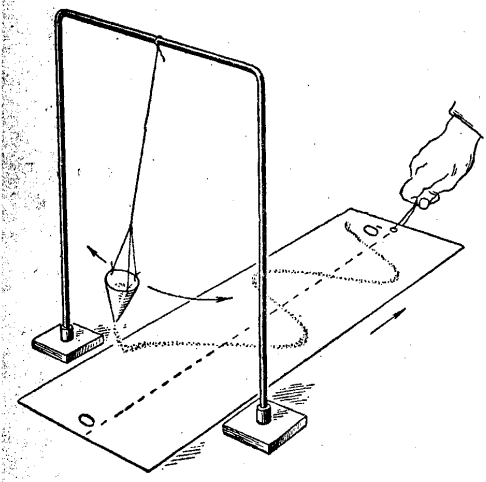


Рис. 53а. Установка для записи колебания маятника.

Стеклянная воронка, заполненная песком, колеблется в одной плоскости. Под ней находится фанера с нанесённой посередине «нулевой» линией OO_1.

Если фанера будет неподвижна, то воронка при отклонениях от положения равновесия вправо будет высыпать песок по одну сторону от нулевой линии, а при отклонениях влево — по другую. При равномерном движении фанеры насыпаемая воронкой песчаная дорожка будет пересекать нулевую линию OO_1 через одинаковые промежутки времени, равные половине периода $\left(\frac{T}{2}\right)$.

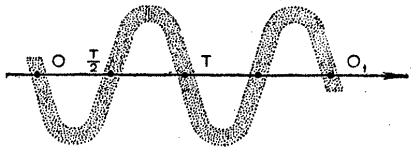


Рис. 53б. График колебания маятника.

Если представить себе, что в каждый момент времени воронка высыпает определённую порцию песка, то эти песчаные порции будут фиксировать на фанере положение маятника в каждый момент времени. Кратчайшее расстояние от любой произвольно взятой песчаной порции до нулевой линии будет равно смещению маятника x в данное мгновение. Максимальная величина смещения определит нам амплитуду колебания (A). Непрерывное следование песчаных порций создаст непрерывную песчаную дорожку, графически изображающую изменение смещения маятника в зависимости от времени (рис. 53б).

Для данного случая песчаный график движения маятника будет иметь вид синусоиды.

Так как графически гармоническое колебание изображается синусоидой, то его часто называют ещё синусоидальным колебанием.

24. Фаза колебаний. Сдвиг фаз. Если два маятника, двигаясь в одну и ту же сторону, в некоторый момент одновременно проходят положение равновесия, то принято говорить, что в этот момент они находятся в одинаковых фазах[1]. Эта одинаковость фаз будет иметь место непрерывно и дальше при условии, если частоты колебаний маятников одинаковы. Такой случай изображён на рисунке 54а. Синусоидальные кривые, представляющие собой графическую запись колебательных движений обоих маятников, при наложении совпадают одна с другой (если амплитуды колебаний маятников одинаковы).

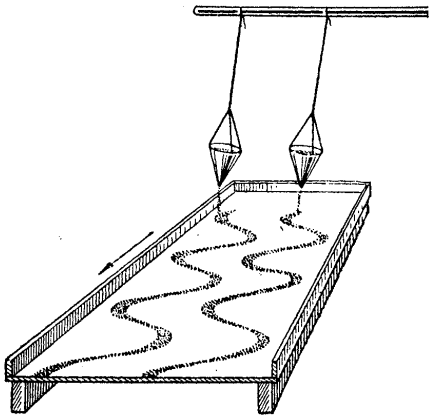


Рис. 54а. Маятники колеблются в одинаковых фазах.

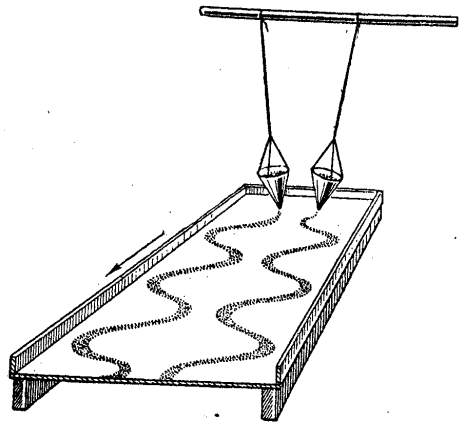


Рис. 54б. Маятники колеблются в противоположных фазах.

Возможен случай, когда маятники, достигая положения равновесия, движутся в противоположные стороны. В этом случае маятники колеблются в противоположных фазах. Синусоидальные кривые, изображающие такой случай колебания (рис. 54б), сдвинуты друг относительно друга во времени на половину периода.

Фаза есть одна из величин, характеризующих колебательное движение. Установим меру этой величины. Для этого свяжем колебательное движение с равномерным движением точки по окружности. На рисунке 55 буквами O, O_1, O_2 и т. д. обозначены различные положения небольшого шарика, движущегося равномерно по окружности, а буквами P_0, P_1, P_2 и т. д. — положения его проекций на плоскость MN. Проекция шарика колеблется около среднего

[1] Фаза (от греч. фазис) — определенный момент, период в развитии какого-либо явления.

положения P_0, отклоняясь от него вверх и вниз. Докажем, что это движение является гармоническим колебанием.

Для какого-нибудь положения проекции P_1 величина отклонения равна:

$$x = P_0P_1 = BO_1.$$

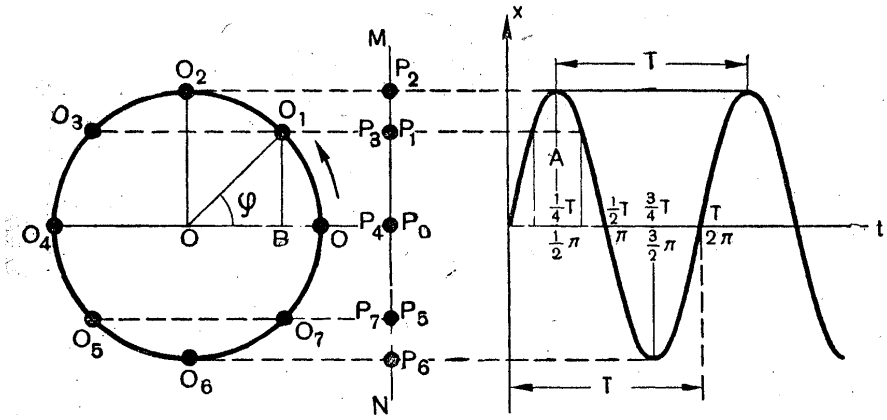


Рис. 55. Проекция P шарика, равномерно движущегося по окружности, на плоскость MN совершает гармоническое колебание, которое графически изображается синусоидой.

Амплитуда колебания (A) равна наибольшей величине отклонения:

$$A = P_0P_2 = OO_2 = OO_1.$$

Из треугольника OBO_1 следует, что $BO_1 = OO_1 \sin \varphi$ или:

$$x = A \sin \varphi. \qquad (1)$$

В полученное выражение входит величина φ. В круговом движении φ есть угол, представляющий собой угловое перемещение шарика за время t, прошедшее с момента выхода его из начального (нулевого) положения: $\varphi = \omega t$, где $\omega = \frac{2\pi}{T}$ — угловая скорость.

Следовательно,

$$\varphi = \frac{2\pi}{T} t.$$

В колебательном движении *величина* φ *называется фазой колебания*. Из полученной формулы видно, что *фаза показывает, какая доля периода прошла от момента начала колебаний*.

Зная фазу колебания, по формуле (1) можно определить величину смещения колеблющейся точки и направление её движения относительно положения равновесия, т. е. определить положение колеблющейся точки в любой момент времени:

$$x = A \sin \frac{2\pi}{T} t. \qquad (1а)$$

Графически уравнение (1 а) изображается синусоидой. Уравнение (1 а) показывает, что колебания проекции шарика, равномерно движущегося по окружности, являются гармоническими.

Положения колеблющейся проекции, отмеченные на рисунке 55 буквами P_0, P_1, P_2 и т. д., отличаются друг от друга по фазе на $\frac{1}{8}T$, или на $\frac{\pi}{4}$.

Откладывая по горизонтальной оси время (в долях периода), протекшее от начала колебания, или фазы колеблющейся точки, а по вертикальной оси — смещения x в каждый момент времени, получим график синусоидального колебательного движения (правая часть рис. 55).

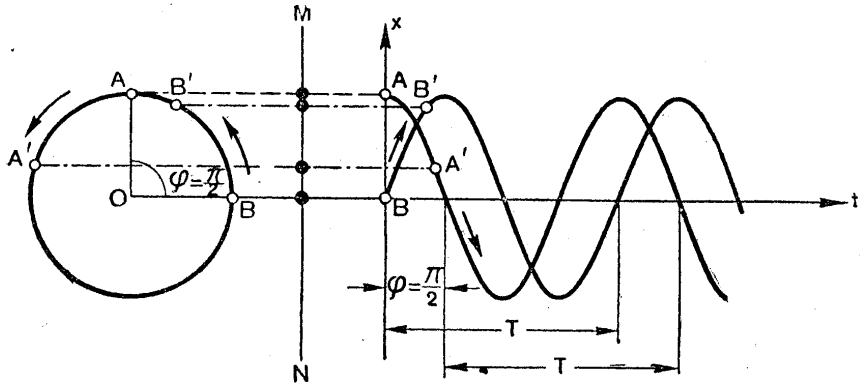


Рис. 56. Проекции шариков A и B на плоскость MN совершают гармонические колебания; синусоиды, изображающие эти колебания, сдвинуты по фазе друг относительно друга на угол $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

На рисунке 56 два шарика A и B движутся равномерно по окружности с одинаковой скоростью. Их проекции на плоскость MN совершают гармонические колебания. Графически эти колебания изображаются синусоидами, сдвинутыми по фазе друг относительно друга на четверть периода $\left(\frac{1}{4}T\right)$, или на $\frac{\pi}{2}$ (90°).

25. Превращения энергии при колебаниях маятника. Отклоняя маятник от положения равновесия, мы совершаем работу по подъёму маятника (рис. 51). При достижении маятником крайнего положения (точка B) увеличивается запас его потенциальной энергии. Если принять величину потенциальной энергии маятника в исходном положении за нуль, то потенциальная энергия в крайнем отклонённом положении (при отсутствии каких-либо потерь) будет равна совершённой работе.

Из положения B движущийся маятник переходит на всё более низкие уровни. Следовательно, его потенциальная энергия убывает и обращается в нуль в самой низшей точке, т. е. в положении равновесия. Одновременно с убылью потенциальной

энергии увеличивается скорость движения маятника, а следовательно, и его кинетическая энергия. Максимум кинетической энергии маятник будет иметь в точке, в которой он имеет наибольшую скорость, т. е. в точке A. Так как мы рассматриваем случай, когда отсутствуют всякие потери энергии, то, согласно закону сохранения энергии, кинетическая энергия маятника в момент прохождения им положения равновесия будет равна потенциальной энергии его в крайнем положении. Для любого промежуточного положения на пути BA сумма потенциальной и кинетической энергий всегда будет равна постоянной величине, равной потенциальной энергии маятника в положении B.

При движении в направлении от A к C маятник перемещается на более высокий уровень, его потенциальная энергия при этом возрастает. Вместе с тем убывают его скорость и кинетическая энергия. Кинетическая энергия маятника обратится в нуль, когда он достигнет точки C, т. е. того уровня, на котором он был в точке B. В точках B и C потенциальная энергия маятника одинакова.

Такого же рода преобразования энергии происходят при колебании пружинного маятника (рис. 50). Только в этом случае увеличение потенциальной энергии при отклонении маятника из положения равновесия происходит в процессе работы против силы упругости, стремящейся вернуть маятник к положению равновесия.

Упражнение 9.

1. Сколько раз за период колебания потенциальная энергия маятника полностью переходит в кинетическую и кинетическая в потенциальную?
2. В какие моменты кинетическая энергия колеблющегося маятника равна его потенциальной энергии?
3. Определить высоту подъема металлического шара, подвешенного на нити, если скорость его движения через положение равновесия равна $140\frac{см}{сек}$.
4. Маятник длиной 1 *м* качается так, что угол наибольшего отклонения его равен 30°. В момент прохождения им положения равновесия нить его зацепилась за гвоздь на середине её длины. Определить наибольший угол отклонения укороченного маятника.

26. Затухающие колебания. Для того чтобы маятник начал колебаться, необходимо сообщить ему некоторый запас энергии, например толкнуть его или отвести в сторону и отпустить. При этом колебания его будут происходить благодаря только начальному запасу энергии. Такие колебания называются с в о б о д н ы м и к о л е б а н и я м и. Свободные колебания маятника не могут продолжаться сколь угодно долго. Опыт показывает, что с течением времени амплитуда колебаний маятника постепенно уменьшается, т. е. после каждого качания высота подъёма маятника уменьшается, и через некоторое время его колебания прекращаются. Это явление свидетельствует о том, что энергия маятника постепенно расходуется на преодоление сопротивления воздуха, сил трения в подвеске и т. д.

Таким образом, уменьшение запаса энергии колеблющегося тела, связанное с отдачей энергии в окружающую среду, вызывает уменьшение амплитуды колебаний. Такое явление называется затуханием колебаний. Колебания с уменьшающейся амплитудой называются затухающими. График таких колебаний показан на рисунке 57.

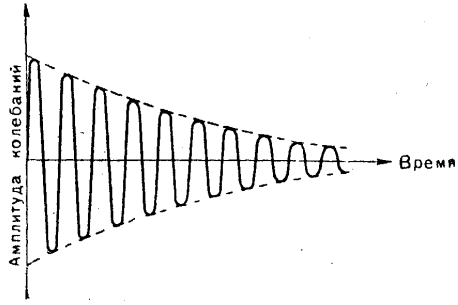


Рис. 57. График затухающих колебаний.

Чем больше сопротивление среды, тем быстрее убывает амплитуда и скорее прекращаются колебания. Маятник может колебаться в воздухе довольно продолжительное время. Тот же маятник, получивший такой же запас энергии, в воде сможет сделать не больше одного-двух колебаний.

Колеблющееся тело расходует энергию не только на работу по преодолению сопротивления окружающей среды, но и на приведение в колебательное движение этой среды, например воздуха.

Практически свободные колебания всегда затухающие. При свободных колебаниях запас энергии сообщается телу только в начале движения, и колебания продолжаются лишь до тех пор, пока этот запас не исчерпается. Чтобы осуществить, например, незатухающие колебания маятника, надо непрерывно пополнять его энергию по мере её расходования.

На явлении затухания колебаний основано устройство особых приспособлений — демпферов [1]. Демпферы используются в многочисленных измерительных приборах, когда требуется, чтобы стрелка прибора, не колеблясь, устанавливалась на соответствующем делении шкалы. На рисунке 58 изображена схема электромагнитного амперметра. Небольшой стальной диск *B* укреплён на оси вблизи катушки *A*. При пропускании по катушке тока диск втягивается в катушку, поворачивая стрелку *C* и одновременно двигая

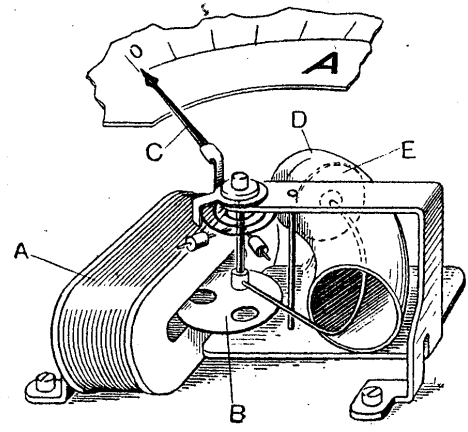


Рис. 58. Схема устройства амперметра электромагнитной системы с воздушным демпфером.

[1] Демпфер (немецкое слово) — приспособление для успокоения механических колебаний.

поршень E в цилиндре D. При этом создаётся разность давлений воздуха с обеих сторон поршня E, которая препятствует возникновению колебаний стрелки.

27. Применение маятника в часах. Примером незатухающих колебаний являются колебания маятника в часах, где его энергия дважды за период пополняется за счёт энергии поднятой гири или заведённой пружины.

Часы представляют собой систему зубчатых колёс, связанную со стрелками и приводимую в движение поднятой гирей или закрученной пружиной. Для правильного хода часов энергия гири или закрученной пружины часов должна использоваться небольшими, периодически расходуемыми порциями. Как это осуществляется, показано на рисунке 59.

Маятник связан с дугой m, имеющей на концах два зубца, которые близко подходят к зубьям храповика[1] R.

Толкнув маятник, мы получим скачкообразное вращение храповика, вызванное тяжестью гири или силой упругости пружины. При каждом колебании маятника храповик будет перескакивать на один зубец, подталкивая вместе с тем и самый маятник, благодаря чему мы получим равномерный ход часов: колебания маятника будут незатухающими до тех пор, пока не истощится завод пружины или не опустится до предела гиря. Передвигая вдоль стержня маятника груз A, мы можем регулировать частоту колебаний маятника, а следовательно, и ход часов.

Первые часы с маятником были изготовлены Гюйгенсом в 1657 г.

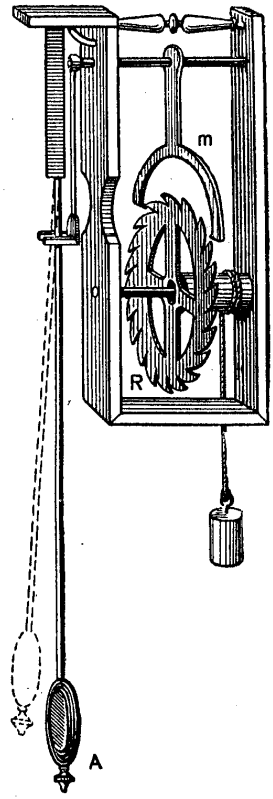


Рис. 59. Модель механизма стенных часов.

Упражнение 10.

1. Как изменяется период колебания маятника при повышении температуры? Как в этом случае изменяется ход часов?
2. Разобрать передачу и превращение энергии в часовом механизме.

27а. Сложение гармонических колебательных движений. Гармоническое колебательное движение, как было установлено, происходит под действием силы, пропорциональной величине смещения и направленной к положению равновесия тела.

---

[1] Храповик — зубчатое колесо, которое может свободно двигаться в одну сторону; движение колеса в другую сторону задерживается зубьями дуги, связанной с маятником.

Такой силой является, например, сила упругости.

Рассмотрим теперь, как будет колебаться тело, если на него будет действовать не одна, а несколько подобного рода сил. Каждая из действующих на тело сил будет вызывать гармоническое колебательное движение, причём каждое движение будет происходить независимо от других в соответствии с принципом независимости движений (§ 2).

Задача сводится к нахождению результирующего гармонического колебательного движения, т. е. к сложению гармонических колебаний.

Простейший случай — это тот, когда складываются два гармонических колебательных движения, совершающихся по одной и той же прямой с одинаковыми периодами (а следовательно, и с одинаковыми частотами) и одинаковыми фазами. Амплитуды колебаний

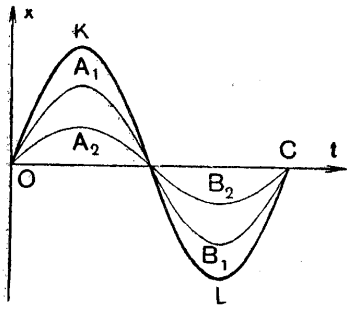


Рис. 59а. Сложение двух гармонических колебательных движений с одинаковыми периодами и фазами.

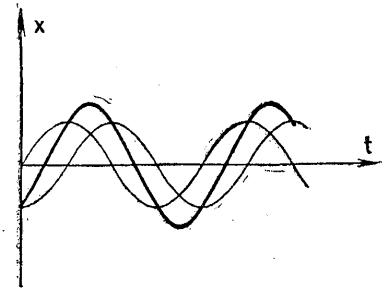


Рис. 59б. Сложение двух гармонических колебательных движений, отличающихся по фазе.

могут быть различны. В данном и в некоторых других случаях задача сложения колебаний весьма просто решается графическим методом.

Пусть OA_1B_1C — синусоида одного гармонического движения, а OA_2B_2C — синусоида второго (рис. 59а). Сложим алгебраически для любого момента времени ординаты, выражающие смещения колеблющегося тела в каждом из этих двух движений. Соединив концы суммарных ординат, мы получим кривую $OKLC$, которая является также синусоидой, имеющей период, одинаковый с периодами слагаемых движений.

Следовательно, *в результате сложения двух гармонических колебательных движений одинаковой частоты, происходящих вдоль одной прямой, получается также гармоническое колебательное движение с той же частотой, как и у составляющих движений.*

На рисунке 59б жирной линией изображён график, получившийся в результате сложения графиков двух гармонических коле-

баний одного и того же периода, равных амплитуд, но по фазе отличающихся на $\frac{\pi}{2}$, или по времени на $\frac{1}{4}T$.

Рассмотрим ещё случай, когда складываются два гармонических колебательных движения одинакового периода, но отличающиеся одно от другого по фазе на π (случай противоположных фаз), или по времени на $\frac{1}{2}T$. Такие движения частично как бы гасят одно другое. Если амплитуды слагающих колебательных движений равны, то тело, участвующее в этих двух движениях, остаётся в покое относительно тела отсчёта. На рисунке 59в показан именно такой случай.

Пользуясь описанным графическим методом, можно показать, что *при любой разности фаз результирующее движение, состоящее*

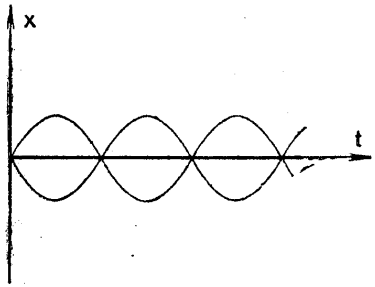


Рис. 59в. Сложение двух гармонических колебательных движений с противоположными фазами.

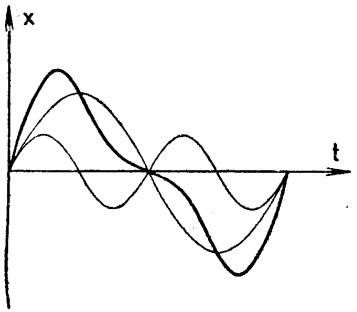


Рис. 59г. Сложение двух гармонических колебательных движений с разными периодами.

из двух гармонических колебательных движений одинакового периода и происходящих по одной и той же прямой, есть гармоническое колебательное движение такого же периода.

Применяя графический метод, можно сложить два гармонических колебательных движения, частоты которых не равны, но кратны друг другу.

На рисунке 59г показан график сложения двух одновременно начавшихся гармонических колебательных движений с различными амплитудами; частоты этих движений относятся, как 1 : 2.

В результате сложения получается не синусоида, а более сложная, периодически повторяющаяся кривая (она изображена на рис. 59г жирной линией).

Из этих примеров видно, что график сложного периодического движения будет иметь вид, зависящий от частот складываемых гармонических колебательных движений, их амплитуд и фаз.

28. Вынужденные колебания. Рассмотренные нами колебания пружинного и нитяного маятников начинались от толчка извне. После толчка тело колебалось свободно, т. е. на него уже не действовала внешняя сила. Эти колебания, как мы видели, являются затухающими.

Свободные колебания называются собственными колебаниями, а частота их — собственной частотой колебания.

В природе и технике широко распространён иной тип колебаний, когда на колеблющееся тело действуют внешние периодически изменяющиеся силы. Рассмотрим один из примеров такого рода колебаний.

Подвесим какое-нибудь тело и будем раскачивать его, действуя на него силой, величина и направление которой периодически меняются. В этом случае тело будет совершать колебания не самостоятельно, не свободно, а под действием этой силы.

Колебания тела под действием внешней, периодически изменяющейся силы называются вынужденными колебаниями.

В отличие от свободных колебаний вынужденные колебания тела могут происходить с любой частотой, которая определяется только частотой изменений внешней силы.

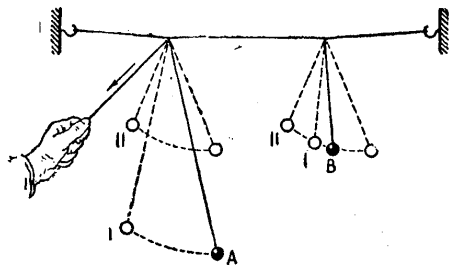


Рис. 60. Установка для изучения резонанса маятников.

Частота вынужденных колебаний тела равна частоте изменения действующей на тело силы.

При вынужденных колебаниях энергия, расходуемая на преодоление всякого рода сопротивлений, восполняется за счёт работы действующей на тело периодической силы. Поэтому в отличие от свободных колебаний *вынужденные колебания являются незатухающими колебаниями.*

29. Резонанс. Рассматривая колебания маятника, мы установили, что возможны два типа колебаний: 1) собственные колебания, частота которых определяется свойствами самого колеблющегося тела, и 2) вынужденные колебания, частота которых равна частоте изменений внешней силы, действующей на тело.

Случай, когда собственная частота колебаний тела совпадает с частотой вынужденных колебаний, особенно важен. Рассмотрим его на опыте.

На рисунке 60 изображена установка, позволяющая наблюдать вынужденные колебания. К верёвочной растяжке подвешены маятники *A* и *B*. Длину маятника *A* можно изменять, подтягивая рукой свободный конец нити, на которой он висит.

Когда маятник *A* находится в положении, обозначенном на рисунке цифрой I, приведём его в колебание. Мы заметим, что и маятник *B* придёт в колебание. Будем теперь изменять длину маятника *A* и наблюдать за маятником *B*. Отмечая при разных длинах маятника *A* амплитуду маятника *B*, можно обнаружить, что с изменением длины маятника *A* меняется амплитуда колебаний маятника *B*. Наибольшего значения амплитуда колебания маятника

B достигнет тогда, когда длины обоих маятников будут одинаковы.

Это явление находит очень простое объяснение. Всем хорошо известно, что при раскачивании какого-нибудь подвешенного на верёвке тела (например, качелей) необходимо подталкивать его извне, хотя и с небольшой силой, но действующей на тело в такт с его собственными колебаниями. Любой же несогласованный толчок (против хода) вызовет уменьшение амплитуды.

Точно так же протекает явление и в нашем опыте с маятниками. Изменяя длину маятника *A*, мы тем самым изменяем частоту изменений вынуждающей силы, действующей на маятник *B*. Причиной, вынуждающей колебания маятника *B*, являются периодические

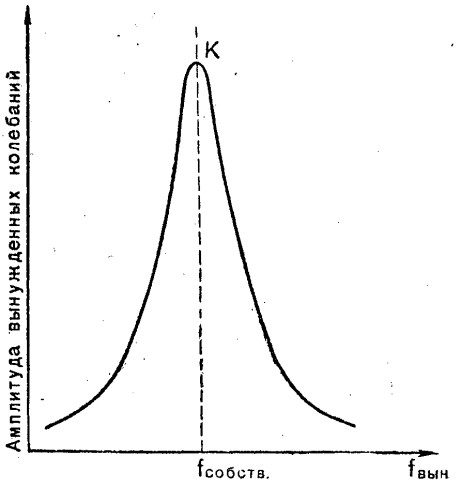


Рис. 61. Резонансная кривая.

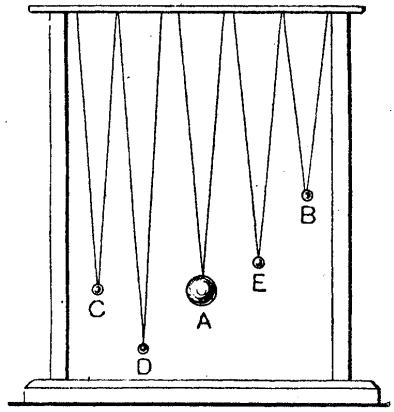


Рис. 62. Установка для наблюдения резонанса маятников.

колебания растяжки с частотой колебания маятника *A*. Чем ближе частота изменений вынуждающей силы подходит к собственной частоте колебаний маятника *B*, тем большее число импульсов силы будет способствовать увеличению амплитуды маятника *B*. Вынужденное колебание маятника *B* будет иметь наибольшую амплитуду тогда, когда собственная его частота будет равна частоте изменений вынуждающей силы, в данном случае частоте колебаний маятника *A* (положение II на рисунке). В этом случае говорят о р е з о н а н с е.

Резонансом называется явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний тела, когда частота изменений вынуждающей силы равна частоте собственных колебаний тела.

Если частота вынуждающих колебаний, т. е. частота колебаний маятника *A*, будет возрастать и далее, то амплитуда вынуж-

денных колебаний маятника B снова будет уменьшаться и при очень большой частоте вынуждающих колебаний станет близкой к нулю.

На рисунке 61 показан график зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты изменений вынуждающей периодической силы. На этом рисунке по горизонтальной оси (оси абсцисс) отложены частоты вынужденных колебаний, а на вертикальной оси (оси ординат) — соответствующие им амплитуды колебаний тела. Когда частота вынужденных колебаний ($f_{\text{вын}}$) становится равной собственной частоте колебаний тела ($f_{\text{собств}}$), амплитуда колебаний достигает наибольшей величины. На рисунке 61 такая амплитуда изображена ординатой точки K. Частоту $f_{\text{вын}} = f_{\text{собств}}$ называют **резонансной частотой**. При отклонении частоты периодически изменяющейся вынуждающей силы от резонансной частоты (влево или вправо от неё) амплитуда колебаний уменьшается.

Явление резонанса наглядно можно продемонстрировать на следующем простом опыте. Подвесим к стойке массивный маятник A (рис. 62) и рядом с ним несколько других маятников разной длины.

Выведем маятник A из положения равновесия. Колебания этого маятника передадутся стойке, а последняя будет действовать с частотой, равной частоте маятника A, на другие маятники. Мы увидим, что только маятник C, длина которого равна длине маятника A, сильно раскачается. Этот маятник находится в резонансе с маятником A. Маятники же D и E будут колебаться с очень малой амплитудой, а самый короткий маятник B почти совсем не будет колебаться; его частота далека от частоты колебаний маятника A.

30. Значение резонанса в технике. Явление резонанса приходится учитывать в технике. Рассмотрим некоторые примеры.

Вследствие неравномерности хода всякая машина совершает небольшие колебания, частота которых равна числу оборотов вала машины в секунду. Если эта частота совпадёт с собственной частотой упругих колебаний, которые могут совершать различные части машины или опора, на которой установлена машина, то наступит резонанс. Амплитуды этих вынужденных колебаний могут оказаться столь большими, что произойдёт катастрофа — разрушится машина или опора.

Случалось, что вследствие резонанса разваливался на части самолёт в воздухе, а под действием периодических толчков колёс поезда на стыках рельсов обрушивался железнодорожный мост.

Разительный случай резонанса имел место в 1907 г., когда в зале заседания Государственной думы в Таврическом дворце (в Петербурге) обвалилась вся штукатурка с потолка. Виновником этой катастрофы оказался небольшой мотор, установленный под потолком и служивший для вентиляции.

Можно привести много примеров поломок коленчатых валов машин, гребных винтов у судов, воздушных винтов у самолётов, которые вызывались явлением резонанса. Во всех таких случаях с резонансом приходится бороться.

Однако резонанс играет в технике не только вредную роль. Явление резонанса, как мы увидим дальше, используется в устройстве многих приборов.

31. Волновое движение. Образование поперечных волн. В опыте с резонансом маятников (§ 29) колебания от одного маятника к другому передаются благодаря связи между ними. От одного маятника колебания передаются перекладине, к которой подвешены маятники, а от перекладины — к другим маятникам.

Так как во всяком теле составляющие его частицы связаны между собой, то колебания одной какой-либо частицы передаются постепенно другим частицам. *Распространение колебаний в среде представляет собой волновое движение.*

Рассмотрим простейший случай распространения колебаний. Расположим на столе длинный шнур или резиновую трубку. Если один конец шнура быстро отвести вверх и вернуть обратно, то образовавшийся изгиб «побежит» по шнуру с некоторой скоростью. Если двигать конец шнура непрерывно, заставляя его колебаться, то по шнуру «побежит» волна (рис. 63).

Рассмотрим прежде всего причины, вызывающие передачу колебательного движения от одной части шнура к другой, иначе говоря, рассмотрим динамику волнового движения.

Смещение рукой вверх конца шнура вызывает натяжение шнура в этом месте.

Рис. 63. Образование волны.

Вызванные натяжением шнура силы упругости тянут за смещённым концом шнура следующую ближайшую к нему часть. Смещение этой второй части вызывает натяжение в следующей части шнура и т. д.

Но части шнура, на которые мы его мысленно разбили, обладают инерцией и поэтому под действием сил упругости приходят в колебательное движение не мгновенно, а с некоторым запозданием.

Когда конец шнура доходит до верха и начинает двигаться вниз, смежная с ним часть шнура по инерции продолжает движение вверх и лишь спустя некоторое время доходит до верха, а затем идёт вниз. Чем дальше расположена часть шнура от его конца, тем она позднее начинает совершать колебательное движение.

Важно уяснить, что *в волновом движении каждая частица шнура совершает такое же колебательное движение, какое*

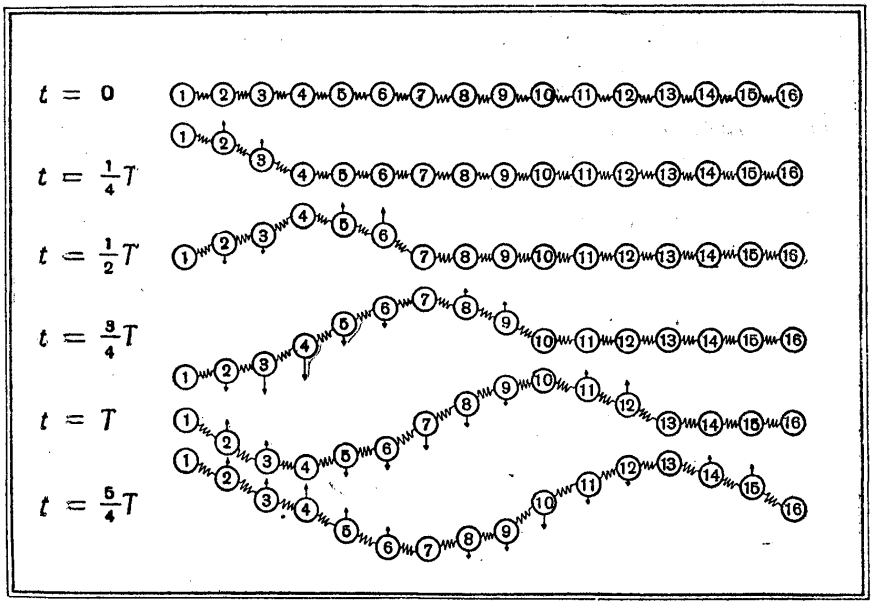


Рис. 63а. Механизм образования поперечной волны.

мы рукой заставляем совершать конец шнура. Но колебание частицы тем больше запаздывает (отстаёт по фазе), чем дальше эта частица расположена от конца шнура.

Уяснению этого довольно сложного явления может помочь рисунок 63а. На этом рисунке изображены связанные между собой силами упругости занумерованные частицы, совершающие гармонические колебания около своих положений равновесия. Амплитуда и частота колебаний у всех частиц одинакова.

Колебание каждой следующей частицы происходит с отставанием по фазе от колебаний предшествующей. Частица 4 отстаёт от первой на $\frac{1}{4}\,T$ (по фазе отстаёт на $\frac{\pi}{2} = 90°$), частица 7 — на $\frac{1}{2}T$ (по фазе отстаёт на $\pi = 180°$), частица 10 — на $\frac{3}{4}\,T$ (или на $\frac{3}{2}\,\pi = 270°$), а частица 13 отстаёт от первой частицы на целый период (а по фазе на $2\pi = 360°$), т. е. колеблется так же, как и частица 1; частица 14 колеблется так же, как 2, частица 12, как 3, и т. д.

На рисунке 63а стрелочки указывают направление скорости колеблющейся частицы относительно положения равновесия.

За один период колебания волна передвигается на расстояние, равное расстоянию между точками 1 и 13, колеблющимися с разностью фаз в 360°, т. е. колеблющимися одинаково (разность фаз в 360° равносильна разности фаз в 0°).

Расстояние между ближайшими точками синусоидальной волны, колеблющимися в одинаковых фазах, называется длиной волны.

Обозначается длина волны буквой λ (греч. «ламбда»).

На рисунке 63а длиной волны будет расстояние между точками 1—13, или между 2—14, или между 4—16.

На протяжении одной длины волны мы встретим частицы, колеблющиеся во всевозможных фазах. С начала каждой длины волны фазы колебания повторяются. Одинаковыми фазами обладают такие точки, которые отстоят друг от друга на 1, 2, 3, вообще на целое число длин волн. Если же точки отстоят друг от друга на $\frac{\lambda}{2}$, $3\frac{\lambda}{2}$, $5\frac{\lambda}{2}$, т. е. на нечётное число полуволн (см., например, частицы 1 и 7 на рис. 63а), то фазы таких двух точек противоположны друг другу, т. е. отличаются на $\pi = 180°$.

Для волнового движения характерны периодичность во времени и периодичность в пространстве. Действительно, каждая частица среды совершает периодические колебания во времени и в то же время в каждый момент времени все частицы располагаются по линии, форма которой периодически повторяется в пространстве.

Рассмотренные нами волны на верёвке — п о п е р е ч н ы е в о л н ы; частицы в этих волнах колеблются в направлении, перпендикулярном распространению волны.

Если бросить камень в пруд, то можно видеть, как от места падения камня по воде будут распространяться круговые волны (рис. 64). При падении камень вытесняет воду, и в месте его падения на воде образуется впадина. Вытесненная из этой впадины вода образует около впадины кольцеобразный гребень. Этот гребень сейчас же начинает расширяться во все стороны и всё дальше отходить от места падения камня. За первым гребнем образуется второй, за ним третий и т. д. Гребни друг от друга отделены впадинами.

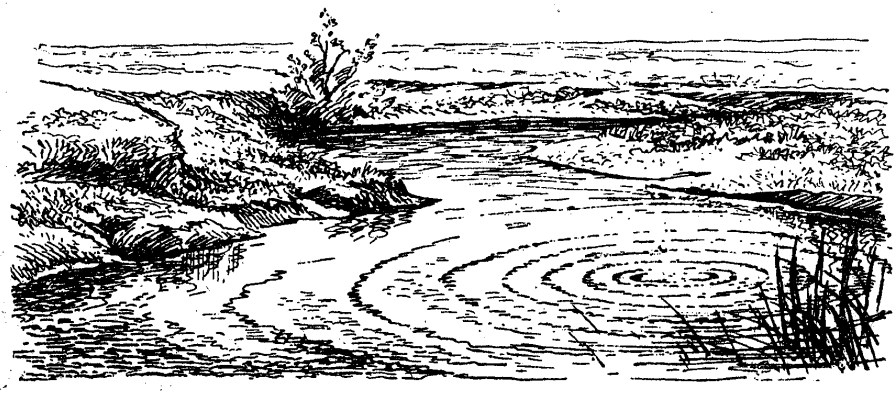


Рис. 64. Волны на поверхности воды.

Весьма важно уяснить, что вода вовсе не переносится вместе с волной. В этом легко убедиться на опыте. Разбросаем по поверхности воды ряд поплавков (пробки, кору и т. п.). Волны бегут по поверхности воды, а поплавки остаются на месте и лишь поднимаются вверх, попадая на гребень волны, и опускаются вниз, когда попадают во впадину. Так же ведут себя и отдельные частички воды; они тоже не бегут вместе с волной, а лишь колеблются вверх и вниз в направлении, перпендикулярном к водной поверхности, по которой движется волна.

32. Продольные волны. Кроме поперечных волн, могут быть волновые движения с колебаниями вдоль направления распространения. Волны такого вида называются п р о д о л ь н ы м и.

Продольные волны могут распространяться как в твёрдых, так и в жидких и газообразных телах, так как у всех этих тел при изменении объёма возникают силы упругости. Наблюдать продольные волны удобно на длинной спиральной пружине (рис. 65). Ударом

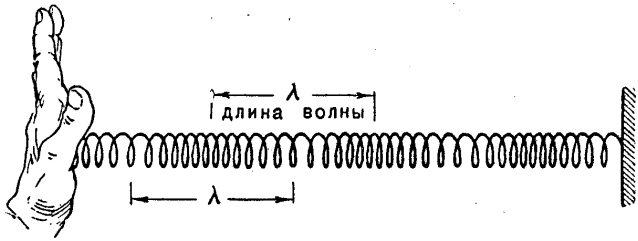


Рис. 65. Пример образования продольных волн.

по одному концу пружины создаётся сгущение витков, которое «бежит» по пружине. Процесс распространения продольных волн можно пояснить с помощью рисунка 66.

Пусть у нас имеется ряд упруго связанных частиц 1, 2, 3..., 16, находящихся на равных расстояниях друг от друга (рис. 66). Мы даём толчок частице 1 вправо вдоль линии 1—16. От толчка частица придёт в колебательное движение. Она приблизится к соседней частице и приведёт её тоже в колебательное движение, та передаст колебательное движение следующей частице и т. д. В результате все частицы постепенно начнут колебаться, но не одновременно, а так, что каждая следующая частица начинает колебания несколько позже предыдущей; поэтому колебаться они будут с одним и тем же периодом, но с разными фазами. На рисунке 66 каждая последующая строка даёт положения частиц через $\frac{1}{4}$ периода колебания. Мы видим, что в результате смещений колеблющихся частиц от их средних положений сначала образуется сгущение частиц, а за ним следует разрежение. На рисунке 66 пунктирными линиями изображены графики колебаний частиц 1, 4, 7, 10 и 13.

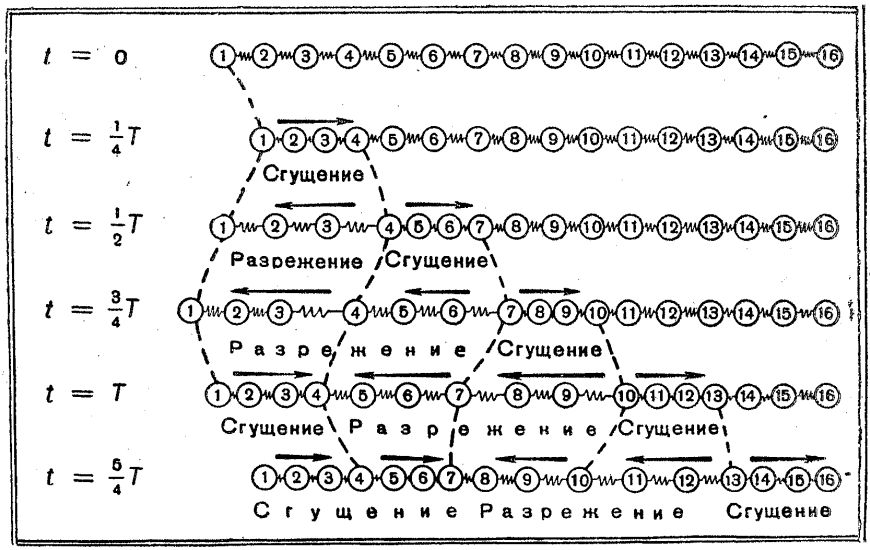


Рис. 66. Образование продольных волн.

Графически продольные волны изображаются так же, как и поперечные волны, — в виде синусоид, причём гребень синусоиды соответствует сгущению в продольной волне, а впадина — разрежению.

В твёрдых телах упругие силы возникают как при изменении их формы, так и при изменении объёма. Поэтому в твёрдых телах могут распространяться как продольные, так и поперечные волны.

В газах и жидкостях при изменении формы силы упругости не возникают, поэтому поперечные волны, вызываемые силами упругости, распространяться в них не могут.

Примером волнового движения в твёрдом теле в большом масштабе является распространение колебаний во время землетрясений внутри земного шара или вдоль поверхностной коры Земли. Наблюдательная станция, расположенная вдали от центра землетрясения, принимает прежде всего продольные волны. Исследованиями установлено, что после прихода первой продольной волны появляются поперечные волны, скорость распространения которых меньше, чем скорость распространения продольных волн.

Если знать скорость обоих видов волн и промежуток времени между их приходом, то на основании теории (её изучают в специальных высших учебных заведениях) можно определить расстояние центра землетрясения от наблюдательной станции. Приборы, улавливающие колебания, пришедшие от места землетрясения, называются *сейсмографами*.

С помощью сейсмографов можно записать колебания поверхностных слоёв Земли и определить интенсивность колебаний.

33. Длина волны и скорость распространения волн. И для продольных, и для поперечных волн *длина волны есть расстояние, на которое распространяются колебания в среде за время, равное одному периоду колебания.*

На рисунке 66а расстояние KK' представляет собой длину поперечной волны.

Длиной продольной волны будет расстояние между серединами двух соседних сгущений или разрежений (рис. 65).

Зная длину волны и период колебаний, можно определить скорость распространения колебаний в среде, или, иначе, с к о р о с т ь в о л н о в о г о д в и ж е н и я.

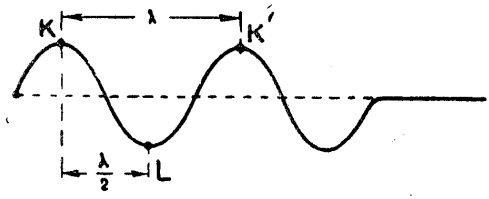


Рис. 66а. К понятию длины волны.

Скоростью движения волны считается скорость перемещения гребня или впадины в поперечной волне, сгущения или разрежения в продольной волне.

За время, равное периоду колебаний, сгущение и разрежение, или гребень и впадина, перемещаются на расстояние, равное длине волны. Следовательно, скорость движения v волны будет измеряться отношением длины волны λ к периоду колебаний T, т. е. $v = \frac{\lambda}{T}$. Так как $\frac{1}{T} = f$, то можно написать, что

$$v = \lambda f,$$

т. е. ***величина скорости распространения колебаний в среде равна произведению длины волны на частоту колебаний.***

Волна переносит (передаёт) энергию от одной колеблющейся частицы среды к другой. Энергия начальной частицы, приведённой в колебания (такую частицу называют в и б р а т о р о м [1]), непрерывно будет уменьшаться, распределяясь между частицами среды, и волновой процесс, затухая, в конце концов прекратится.

Для поддержания непрерывного волнового процесса необходимо непрерывно пополнять вибратор энергией.

Упражнение 11.

1. Сложить два гармонических колебательных движения с одинаковыми периодами и равными амплитудами, отличающиеся по фазе на 30°.

2. Вычертить график колебательного движения, состоящего из двух гармонических колебательных движений, периоды которых относятся между собой, как 1 : 3. Амплитуды составляющих колебаний взять одинаковыми.

[1] В и б р а т о р — от лат. в и б р а р е — колебать, качать, дрожать.

ГЛАВА III

ЗВУК

34. Происхождение звука. Среди разнообразных колебательных и волновых движений, встречающихся в природе и технике, особо важное значение в жизни человека имеют звуковые колебания и волны, или, просто, звуки. Достаточно сказать, что наша речь, дающая нам возможность общаться друг с другом, состоит из ряда следующих друг за другом звуков. Мы легко отличаем голос одного человека от голоса другого, одно слово от другого слова.

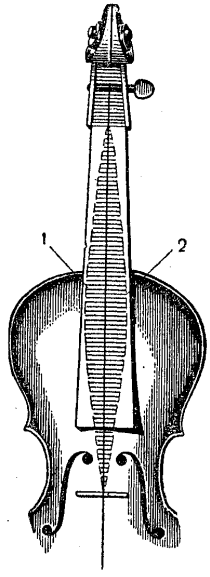


Рис. 67. Колебание звучащей струны.

Ухо, при помощи которого мы воспринимаем звук, улавливает даже мельчайшие оттенки человеческого голоса: радость, грусть, гнев и т. д.

Отдел физики, в котором изучаются звуковые явления, называется акустикой [1].

Простые наблюдения показывают нам, что части звучащего тела колеблются.

Присмотримся внимательно к звучащей струне; она стала в середине как бы толще, а очертания её сделались менее ясными. Вид струны изменился оттого, что она колеблется между крайними положениями *1* и *2* (рис. 67). Колебания струны настолько быстры, что мы не можем следить за её движением. Если к звучащей струне приблизить конец бумажной полоски, то полоска будет подпрыгивать от толчков струны. Пока струна колеблется, мы слышим звук; остановим струну, и звук прекращается.

Рис. 68. Обнаружение колебаний звучащего камертона.

При изучении звуковых явлений очень часто в качестве источника звука пользуются камертоном (рис. 68). Если по камертону

[1] От греч. слова акустикос — слуховой.

ударить мягким молоточком или провести по нему смычком, то камертон зазвучит.

Поднесём к звучащему камертону лёгкий шарик (стеклянную бусинку), подвешенный на нитке, — шарик будет отскакивать от камертона.

Дрожание звучащего камертона можно почувствовать и непосредственно, дотронувшись слегка до его ножек пальцем. Если же ножку камертона зажать, то он не сможет больше колебаться и звук прекратится.

Источниками звуков особенно легко становятся тела, обладающие большой упругостью, например натянутая стальная струна, камертон, зажатая одним концом в тисках стальная пластинка, колокольчик, деревянная дощечка и др. Источниками звуков могут

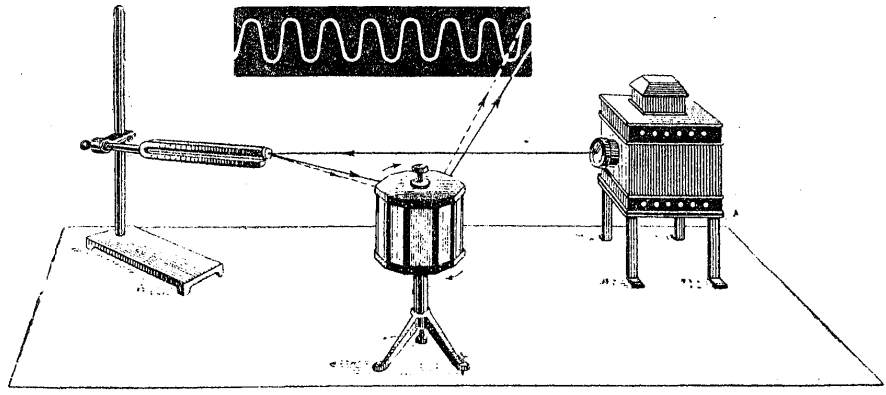


Рис. 69. Запись колебаний камертона.

быть не только твёрдые тела, но и жидкости, а также газы. Так, нередко вода «поёт» в водопроводных трубах или «гудит» воздух в дымоходе; колеблющийся столб воздуха — источник звука в органных трубах и в различных других духовых инструментах.

35. **Простой вид звуковых колебаний.** Исследуем несколько подробнее колебательное движение камертона. Для этого прикрепим к одной из ножек камертона лёгкое зеркальце и пустим на зеркальце тонкий пучок света. Свет отражается от зеркальца, затем падает на другое многогранное зеркало, могущее вращаться вокруг вертикальной оси, отражается от него и попадает на экран (рис. 69). На экране образуется небольшое светлое пятно. Если теперь заставить звучать камертон, слегка ударив его резиновым молоточком, то на экране вместо светлого пятна образуется вертикальная чёрточка.

Остановим камертон и будем быстро вращать многогранное зеркало, на экране мы заметим сплошную горизонтальную линию.

Если теперь снова возбудить камертон так, чтобы он зазвучал, то на экране мы получим синусоиду (рис. 69). Следовательно, *колебания камертона — синусоидальные, или гармонические, колебания.* Они представляют собой наиболее простой вид звуковых колебаний.

36. Классификация звуков. По форме и характеру волны принято различать три вида звуков: 1) звуковые удары, 2) шумы и 3) музыкальные звуки, или тоны.

Звуковые удары возникают при выстреле, взрыве, электрической искре, при ударе каких-нибудь тяжёлых тел и т. п. Ударная волна, соответствующая этим звукам, представляет собой единичную волну.

Шумы представляют собой последовательность непериодических ударов. Таковы, например, шум ветра в листьях деревьев, треск при ломании дерева, лязг железа, скрип и т. д.

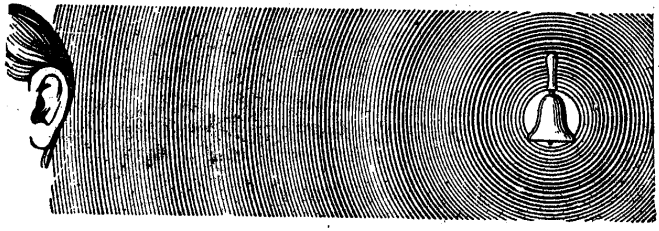


Рис. 70. От звучащего колокольчика в воздухе распространяются волны, доходящие до уха.

Музыкальные звуки вызываются периодическими колебаниями источников звуков: они состоят из ряда непрерывно следующих одна за другой волн одинаковой длины и формы в упругих телах. Таковы, например, звуки, издаваемые камертоном, музыкальными инструментами, певцами и т. д.

37. Распространение звука. Мы воспринимаем звук благодаря нашему органу слуха — уху. Ухо является для нас приёмником звука. Между ухом и звучащим (колеблющимся) телом — вибратором — находится передающая среда; чаще всего ею служит воздух.

Когда какое-нибудь тело звучит, оно колеблется, его колебания передаются прилежащим частицам воздуха, которые тоже начинают колебаться и передают колебания соседним частицам, а эти в свою очередь передают колебания дальше и т. д. В результате в воздухе образуются и распространяются звуковые волны (рис. 70). Эти волны вызываются колебательным движением частиц среды (воздуха), причём частицы колеблются в направлении распространения волны, т. е. совершают продольные колебания.

Необходимое условие для передачи звука от вибратора к приёмнику (в частности, к нашему уху) — существование упругой среды

между вибратором и приёмником. Схематически процесс распространения звука можно представить так:

вибратор — передающая среда — приёмник.

Если между вибратором и приёмником удалить упругую звукопередающую среду, то звуковые волны не возникнут и, следовательно, приёмник не воспримет звука.

Поместим под колокол воздушного насоса часы-будильник (рис. 71). Пока в колоколе находится воздух, звук звонка мы слышим ясно. При откачивании воздуха из-под колокола звук постепенно слабеет и, наконец, становится неслышимым. Молоточек продолжает ударять по тарелке звонка, следовательно, тарелка колеблется, но эти колебания дальше уже не могут распространяться (нет передающей среды) и не могут дойти до нашего уха. Впустим под колокол воздух и снова услышим звон.

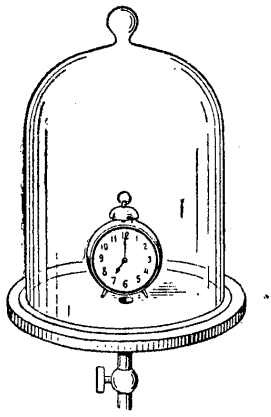


Рис. 71. Опыт, доказывающий, что безвоздушное пространство не передаёт звуковых колебаний.

Положим на один конец деревянной доски карманные часы, а сами отойдём к другому концу. Приложив ухо к доске, мы ясно услышим ход часов.

Привяжем к металлической ложке бечёвку. Концы бечёвки приложим к ушам. Ударяя по ложке, услышим сильный звук. Ещё более сильный звук услышим, если бечёвку заменим проволокой, но совсем не услышим звука, если вместо бечёвки возьмём резиновый шнур.

Способность различных тел передавать звуковые колебания называется звукопроводностью.

Мягкие и пористые тела — плохие проводники звука. Чтобы защитить какое-нибудь помещение от проникновения посторонних звуков, стены, пол и потолок прокладывают прослойками из звукопоглощающих материалов. Такими материалами являются: войлок, прессованная пробка, пористые камни, свинец. Звуковые волны в таких прослойках быстро затухают.

Жидкости хорошо проводят звук. Рыбы, например, слышат шаги и голоса на берегу, это известно опытным рыболовам.

Итак, ***звуковые волны распространяются в твёрдых, жидких и газообразных телах, но не могут распространяться в безвоздушном пространстве.***

38. Скорость распространения звука. Простые наблюдения показывают, что звук распространяется в каждой среде с определённой скоростью.

Когда мы смотрим издалека на стрельбу из ружья, то сначала видим огонь и дым, а потом через некоторое время слышим звук выстрела. Дым появляется в то же время, когда происходит

первое звуковое колебание. Измерив промежуток времени (t *сек*) между моментом возникновения звука (момент появления дыма) и моментом, когда он доходит до уха, и зная расстояние (s *м*) от нас до источника звука, можно определить скорость распространения звуковых волн, или скорость звука:

$$v = \frac{s}{t}.$$

Измерения показывают, что скорость звука в воздухе при 0° С и нормальном атмосферном давлении равна 332 $\frac{м}{сек}$.

При повышении температуры воздуха скорость звука возрастает, так как при этом возрастает упругость воздуха. Например, при 15° С скорость звука в воздухе равна 342 $\frac{м}{сек}$, при 30° С — 349 $\frac{м}{сек}$, при 100° С — 386 $\frac{м}{сек}$.

В других газах скорость звука иная, чем в воздухе. Чем легче газ, тем подвижнее молекулы его и тем скорость звука в нём больше. В водороде она равна 1280 $\frac{м}{сек}$ при 0° С. В углекислом газе скорость звука меньше: при 0° С она равна 260 $\frac{м}{сек}$. Скорость звука в воде в $4^1/_2$ раза больше, чем в воздухе. В металлах скорость звука ещё больше.

Скорость звука в различных средах

(при 0°С) $\left(\frac{м}{сек}\right)$	
Воздух	332
Вода	1450
Медь	3800
Железо	4900
Стекло	5600
Еловое дерево	4800
Пробка	430—530
Каучук	50

39. Музыкальные звуки. Высота тона. Музыкальные звуки, или, как принято говорить, музыкальные тоны, характеризуются высотой, громкостью и тембром.

Возьмём два камертона, издающие звуки разной высоты, и запишем графики их колебаний на закопчённой пластинке. Мы получим кривые, изображённые на рисунке 72. Верхняя кривая получена от камертона, дающего низкий тон, нижняя — от камертона с высоким тоном. В первом случае получилась кривая с более длинной волной, во втором — с волной меньшей длины. Отсюда видно, что у первого камертона (с низким тоном) больший период колебаний и меньшая частота, чем у второго.

В случае гармонических звуковых колебаний, каковыми, например, можно считать колебания камертона, наше ощущение высоты тона объективно соответствует частоте колебаний. Чем меньше период и соответственно больше частота колебаний, тем выше тон, и, наоборот, чем меньше частота колебаний, тем ниже тон.

Таким образом, ***физическим явлениям — колебаниям разной частоты — соответствуют ощущения разной высоты тонов.***

Наше ухо способно воспринимать как звук колебания в пределах от 20 до 20 000 *гц*.

Пределы для звуков человеческого голоса заключаются между 64 *гц* (низкая басовая нота) и 1300 *гц* (верхняя сопрановая нота). Нижняя нота «ля» рояля имеет 27,5 *гц*, а его верхнее «до» — 4096 *гц*.

В природе встречаются колебания, имеющие частоту, не воспринимаемую нашим ухом. От такого неслышимого источника звука волны, конечно, всё же доходят до уха и воздействуют на барабанную перепонку, но слуховой аппарат не отзывается на эти воздействия. Звуковые колебания, частоты которых лежат за пределами слышимых, т. е. выше 20 *кгц*, называются ультразвуками.

Рис. 72. Верхняя кривая соответствует низкому тону, нижняя — высокому тону.

Современная техника располагает средствами получения ультразвуков в широком диапазоне частот от 20 *кгц* до 500 *Мгц*.

Ультразвуки в настоящее время нашли довольно широкое применение в технике. Ими пользуются, например, для измерения морских глубин (эхолоты). Ультразвуки применяются для обнаруживания различного рода дефектов в металлических изделиях и отливках (ультразвуковая дефектоскопия). При помощи ультразвуковых колебаний получают различного рода эмульсии.

Ультразвуки могут производить биологические и физиологические действия. Например, облучение ультразвуками семян повышает их всхожесть, облучение ультразвуками молока предохраняет его на длительное время от скисания. Красные кровяные шарики под действием ультразвуков разрушаются, и вследствие этого животные погибают. Более подробные сведения об ультразвуке изложены в приложении к учебнику.

40. Сила и громкость звука. *Силой звука* [1] *называется величина, измеряемая количеством энергии, ежесекундно протекающей через площадку в 1 см², перпендикулярную к направлению звуковой волны.*

Силу звука измеряют в $\frac{эрг}{см^2 \cdot сек}$ или в $\frac{дж}{м^2\ сек}$.

[1] Слово сила в выражении сила звука не соответствует содержанию этого понятия, так как мы имеем здесь дело не с силой, а с энергией.

Силе звука соответствует ощущение громкости, подобно тому как частоте колебаний — высота тона.

Сила звука и громкость — понятия неравнозначные. Сила звука характеризует физический процесс независимо от того, воспринимается ли он слушателем или нет, громкость же — субъективное качество звука.

Рассмотрим теперь, от чего зависит сила звука, а следовательно, и его громкость. Запишем для этого колебания камертона последовательно несколько раз с некоторыми промежутками во времени (рис. 73). Звук камертона постепенно затихает, и это сейчас же отражается на графике его колебаний.

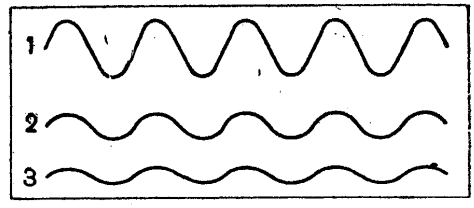


Рис. 73. График трёх тонов одинаковой частоты, но различной громкости; кривой с большей амплитудой колебания соответствует более громкий тон.

Как видно из графиков 1, 2, 3, период колебаний камертона не менялся: гребни и впадины на всех трёх графиках одинаково часты. Но по мере ослабления звука уменьшалась амплитуда колебаний. У самого сильного звука амплитуда была наибольшей (график 1); когда звук стал почти неслышим, амплитуда колебаний оказалась маленькой (график 3). Когда камертон перестанет колебаться, график обратится в прямую линию.

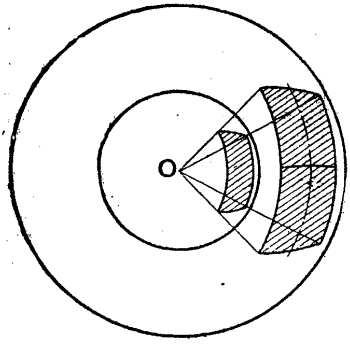


Рис. 74. Энергия в звуковой волне, приходящаяся на каждую единицу поверхности, изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от точечного источника звука.

Таким образом, мы видим, что сила звука связана с амплитудой колебаний. *Чем больше амплитуда колебаний, тем сильнее звук; чем меньше амплитуда, тем звук слабее.*

Когда какое-нибудь тело звучит, то оно приводит в колебание окружающие частицы среды (например, частицы воздуха) и отдаёт им при этом часть своей энергии. Запас энергии в звучащем теле уменьшается, уменьшается амплитуда его колебаний, ослабевает звук.

При распространении в среде звук ослабевает по мере удаления от источника. Вся энергия, которая сначала была сосредоточена около одного центра — источника звука, по мере удаления от него будет распределяться на всё большее и большее число частиц среды; на долю каждой частицы будет приходиться всё меньше и меньше энергии. При распространении звуковых волн

в изотропной[1] среде поверхность распространяющейся волны будет сферой с центром *О*, практически совпадающим с источником звука. Поверхность сферы будет возрастать пропорционально квадрату расстояния от источника; рисунок 74 поясняет это. Энергия, приходящаяся на каждую единицу площади поверхности сферы, будет изменяться обратно пропорционально квадрату расстояния от источника звука. Отсюда: *сила звука изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника звука.* Меняется при этом и связанное с этой величиной ощущение громкости, что каждому известно из опыта.

Если направить звук вдоль трубы с одним и тем же поперечным сечением, то в этом случае распространяющийся звук почти не теряет своей силы. Малое ослабление звука с расстоянием можно наблюдать и в длинных узких коридорах.

Часто для переговоров на расстоянии применяются конусообразные трубы — рупоры. Рупор не даёт звуковым волнам рассеиваться во все стороны и заставляет их идти в одном направлении. Рупором можно воспользоваться также для того, чтобы собрать рассеянные звуковые волны. Приложим рупор к уху его узкой стороной, и звуки усилятся. На ухо действует вся энергия, пришедшая к внешней, широкой стороне рупора. Во сколько раз внешнее отверстие рупора по площади больше отверстия уха, во столько раз усилится и звук.

Наше ухо снабжено собственным рупором — ушной раковиной. Иногда, чтобы улавливать слабые звуки, мы увеличиваем этот рупор, прикладывая руку к ушной раковине.

Человеческое ухо обладает исключительной чувствительностью: оно улавливает звуки, которые в миллион раз слабее человеческого голоса обычной громкости. С другой стороны, человек привыкает переносить и такие сильные звуки, как артиллерийская канонада.

Однако наше ухо оказывается неодинаково чувствительным к звукам разной частоты; наиболее чувствительно оно к тонам, лежащим в пределах 1000—3000 *гц*. Чтобы звук был услышан в условиях наибольшей чувствительности (около 2000 *гц*), звуковые волны, как показывают современные измерения, должны приносить к уху за каждую секунду энергию не менее 5 триллионных долей эрга. Амплитуда колебаний частиц воздуха при этом оказывается меньше одной десятимиллиардной миллиметра. Интересно, что чувствительность глаза к энергии света такого же порядка, как и чувствительность уха к энергии звука.

41. Тембр звука. Всем хорошо известно, что звуки одной и той же высоты, воспроизведённые на скрипке, кларнете, рояле, певцом или певицей, отличаются друг от друга особым качест-

[1] Изотропия (от греческих слов: изос — одинаковый, тропос — характер) — физическая особенность ряда тел, заключающаяся в том, что физические свойства их (теплопроводность, упругость, электропроводность и др.) одинаковы по всем направлениям.

вом — мягкостью или резкостью, меньшей или большей выразительностью. Мы по голосу узнаём знакомых нам людей. Даже у одного и того же человека различные гласные отличаются друг от друга.

Это качество звука, его своеобразная «окраска», называется тембром.

О тембре тона данной высоты можно судить по форме той периодической кривой линии, которая изображает колебания, производимые источником.

Гармонические колебания тел создают волну, имеющую форму, изображённую на рисунке 75а и называемую синусоидальной волной. Такая волна даёт ощущение простого, или чистого, тона.

Рис. 75а. График простого, или чистого, тона.

В скрипке же, где колебания струн возбуждаются смычком, или, например, в язычковой трубе получаются волны более сложной формы (рис. 75б), которым соответствуют и более сложные звуки.

Рис. 75б. График звука, полученного в язычковой трубе.

При помощи специальных анализаторов звука можно установить, что всякий сложный музыкальный звук состоит из ряда простых тонов, частоты колебаний которых относятся, как 1 : 2 : 3 : 4... Наиболее низкий тон в сложном музыкальном звуке называется основным. Он имеет такую же частоту, что и сложный звук. Остальные простые тоны, имеющие вдвое, втрое, вчетверо и т. д. бо́льшие частоты, называются высшими гармоническими тонами или обертонами. В § 27 было установлено, что сложение гармонических колебаний различных частот даёт результирующее колебание, которое изображается сложной периодической кривой (см. рис. 59г). Анализатор же позволяет выделить те простые колебания, которые образуют сложный звук.

На рисунке 76 сверху изображён график звуковой волны, возбуждаемой скрипкой, а внизу — графики трёх синусоидальных волн, один из которых соответствует основному тону, а другие два — двум наиболее интенсивным обертонам.

Подобрав подходящее сочетание чистых тонов при помощи камертонов, можно воспроизвести сложный звук, сходный по тембру со звуком скрипки, язычковой трубы или других каких-нибудь музыкальных инструментов.

В музыке употребляются сложные звуки, богатые обертонами. Чем больше к основному тону примешано обертонов, тем в зависимости от силы каждого из этих обертонов тембр звука будет

разнообразнее. Особенно богаты обертонами звуки скрипки и голоса певцов.

«Простые тоны, какие мы имеем от наших камертонов, — писал А. Г. Столетов, — не употребляются в музыке; они так же пресны и безвкусны, как химически чистая вода, — они бесхарактерны».

42. Отражение звуковых волн. Если звуковые волны на своём пути встречают какую-нибудь преграду (горы, лес, стену и т. п.), они отражаются. Когда отражённая звуковая волна доходит до нашего уха, мы слышим звук, называемый э х о м или отголоском.

Отражённый звук мы услышим через промежуток времени, в течение которого звуковая волна проходит двойное расстояние между источником звука и преградой.

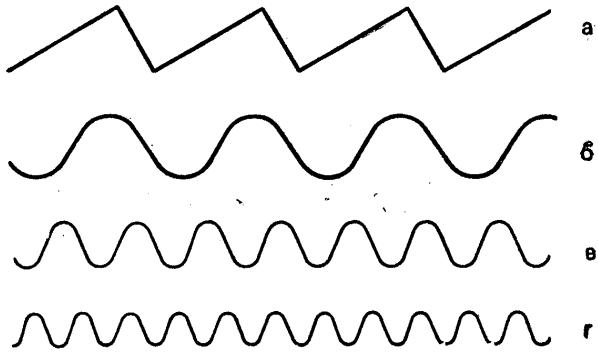


Рис. 76: *а* — график сложного звука скрипки; *б* — график основного тона звука скрипки; *в*, *г* — графики двух наиболее интенсивных обертонов звука скрипки.

Раскаты грома объясняются многократными отражениями его от облаков и земли. Когда звук отражается от близких преград, эхо сливается с первоначальным звуком и усиливает его. Поэтому звуки в закрытых помещениях нам кажутся более громкими, чем на открытом воздухе.

Помещения с гладкими стенами, полом и потолком обладают свойством очень хорошо отражать звуковые волны. В таком помещении благодаря набеганию предшествующих звуковых волн на последующие получается перемешивание звуков, образуется гул: звук в помещении не сразу исчезает вместе с прекращением действия его источника.

Акустика помещения характеризуется так называемым в р е м е н е м р е в е р б е р а ц и и — временем угасания звука до неслышимого предела. Реверберация зависит, с одной стороны, от объёма помещения, а с другой — от его формы и материала стен, потолка и пола.

Помещения с мягкой обивкой стен, коврами, драпировками, мягкой мебелью, а также наполненные людьми слабее отражают

звуковые волны; в значительной степени звуки поглощаются мягкой средой, а потому и реверберация их гораздо меньше.

Но очень уменьшать реверберацию тоже не следует, так как звуки тогда чрезвычайно быстро гаснут и не имеют достаточной громкости и яркости. Певцы и музыканты знают, как трудно петь и играть в небольших комнатах, переполненных мягкой мебелью, драпировками, коврами.

В одном из лучших в акустическом отношении зале — в Колонном зале Дома союзов в Москве — время реверберации около 1,75 *сек*, когда он наполнен публикой, и около 4 *сек* в пустом.

43. Стоячие волны. Встряхнём рукой свободный конец висящей верёвки. По верёвке побежит волна. Волна дойдёт до закреплённого конца, отразится здесь и пойдёт обратно (рис. 77). Если мы будем непрерывно колебать рукой конец верёвки, то получится ряд непрерывно бегущих волн, следующих одна за другой, а навстречу им от закреплённого конца побежит такой же ряд отражённых волн. Обе системы волн будут накладываться друг на друга, образуя так называемую с т о я ч у ю в о л н у. Рассмотрим процесс образования стоячей волны.

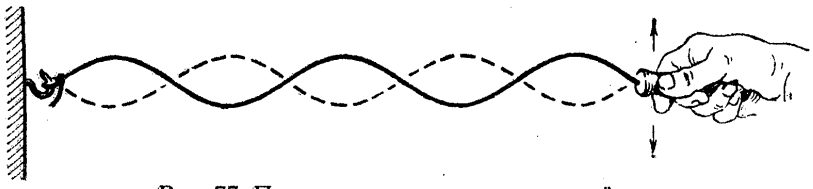


Рис. 77. Получение стоячих волн на верёвке.

Пусть периоды и амплитуды бегущих и отражённых волн одинаковы. В некоторый момент времени обе волны будут налагаться друг на друга так, как показано на рисунке 78, *а*. Затем эти волны разойдутся: одна передвинется на некоторое расстояние вправо, другая — на такое же расстояние влево (рис. 78, *б*).

При совпадении волн точки a_1, a_2, a_3 и т. д. находятся в положении равновесия. Оно сохранится и в случае расхождения волн. Действительно, при расхождении волн одна волна будет смещать точки вверх, другая — на столько же вниз. Такие неподвижные точки называются у з л а м и.

Вся верёвка (рис. 77) разбивается узлами на несколько одинаковых колеблющихся участков. В то время как один из этих участков идёт вверх (гребень), соседний участок отклоняется вниз (впадина).

Точки b_1, b_2, b_3 и т. д. при совпадении волн (рис. 78, *а*) имеют наибольшие смещения, равные удвоенной амплитуде (рис. 78, *в*). При расхождении волн смещения этих точек будут убывать до нуля (рис. 78, *г, д*), а затем, изменяя свои направления (рис. 78, *е, ж*), достигнут наибольшей величины (рис. 78, *з*) и снова будут убывать до нуля и т. д. То же будет происходить и с точками c_1, c_2, c_3 и т. д. Чем ближе такая точка расположена к b_1, b_2 или к b_3, тем с большей амплитудой она будет колебаться.

Точки b_1, b_2, b_3 и т. д., имеющие наибольшие амплитуды колебания, образуют п у ч н о с т и стоячей волны.

Расстояние между двумя соседними пучностями, или между двумя соседними узлами, равно половине длины волны, а расстояние между узлом и ближайшей пучностью равно четверти длины волны.

Из рисунка 78 видно, что все точки, расположенные между двумя соседними узлами, т. е. точки, принадлежащие одной и той же полуволне, имеют одинаковое направление движения (например, все движутся вверх или,

наоборот, вниз) и колеблются в одинаковых фазах. Точки же двух соседних полуволн движутся в противоположные стороны (одни вверх, другие вниз); фазы их колебаний противоположны, т. е. отличаются на π, или на 180°.

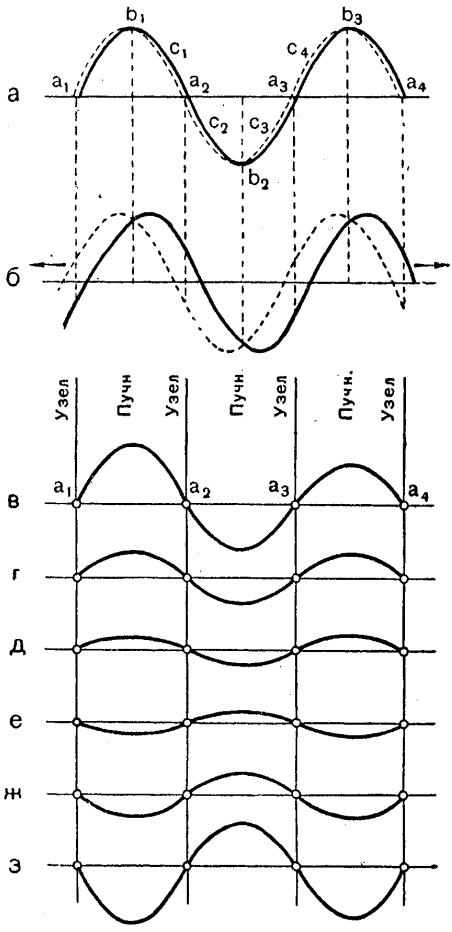


Рис. 78. К объяснению механизма образования стоячих волн.

Энергия в стоячей волне распределена так, что в областях, близких к узлам волны, сосредоточивается главным образом энергия потенциальная, а в областях, близких к пучностям волны, сосредоточивается энергия кинетическая. В тот момент времени, когда кинетическая энергия волны достигает максимума, потенциальная энергия становится минимальной. Через четверть периода максимума достигает энергия потенциальная, а энергия кинетическая убывает до нуля. Таким образом, *в стоячей волне происходит непрерывное превращение и перераспределение энергии, но переноса энергии нет.* Отсюда и термин «стоячая волна».

44. Наблюдение звуковых стоячих волн. Продольные стоячие волны можно обнаружить в воздухе на следующем опыте.

Возьмём стеклянную трубку, закрытую с одного конца (рис. 79), насыплем в неё небольшой слой мелких сухих пробочных опилок. Возбудим теперь перед открытым концом трубки сильный звук. Вдоль трубки в воздухе будет распространяться продольная волна, которая, дойдя до конца трубки, отразится от него. В результате взаимного наложения бегущих и отражённых волн в трубке образуются стоячие волны. Порошок в пучностях встряхивается, в узлах же остаётся в покое. Расположение порошка образует «пыльные фигуры», по которым можно судить о длине стоячих волн. Наполняя трубку какими-нибудь другими газами (например, углекислым газом, светильным газом), мы заметим, что длина волн, образованных от одного и того же источника колебаний, в разных газах разная.

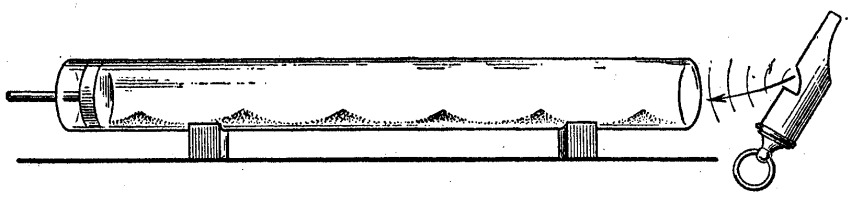


Рис. 79. Действие стоячих волн на порошок в трубке.

В углекислом газе длина волны меньше, в природном газе, наоборот, больше по сравнению с длиной волны в воздухе. Так как период колебаний в нашем опыте — величина постоянная, то из формулы $\lambda = vT$ следует, что скорость распространения волн в углекислом газе и в природном газе должна быть иной, чем в воздухе. В природном газе волны распространяются быстрее, а в углекислом газе медленнее, чем в воздухе.

Длины звуковых волн в воздухе, воспринимаемых нашим ухом, лежат в пределах от 20 *м* (для самых низких звуков) до 1 *см* (для самых высоких).

Звуковые волны одной и той же частоты в воде в $4^1/_2$ раза, а в железе в $10^1/_2$ раз длиннее, чем в воздухе.

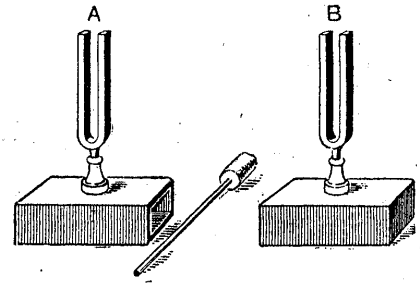


Рис. 80. Камертоны на ящиках для наблюдения звукового резонанса.

45. Звуковой резонанс и резонаторы. Явление резонанса можно наблюдать на механических колебаниях любой частоты, в частности и на звуковых колебаниях. Проделаем следующий опыт. Поставим рядом два одинаковых камертона *A* и *B*, обратив отверстия ящиков, на которых они укреплены, навстречу друг другу (рис. 80). Ударяя резиновым молотком по камертону *A*, приведём его в колебание, а затем приглушим пальцами. Мы услышим звук, издаваемый вторым камертоном *B*, который отзывается на колебания камертона *A* подобно тому, как в опытах с маятниками (рис. 62) маятник *C* отзывался на колебания маятника *A*.

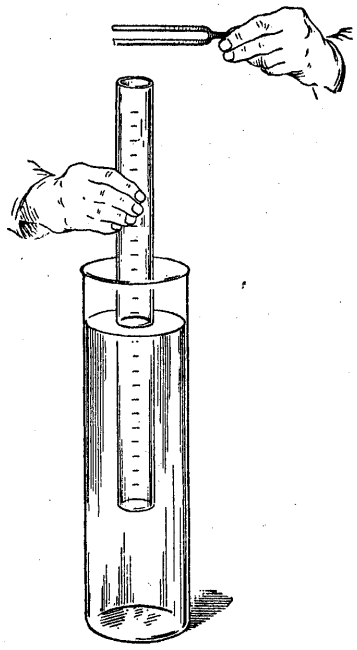


Рис. 81. Резонанс воздушного столба в трубке.

Изменим период колебания камертона *B*, надев на ножку его небольшую муфточку. Повторив опыт, обнаружим, что теперь камертон *B* уже не отзывается на колебания камертона *A*.

Звуковые волны, образованные камертоном *A*, дойдя до камертона *B*, возбуждают вынужденные колебания его с частотой, равной частоте колебаний камертона *A*. Если частота колебаний камертона *B* такая же, как и камертона *A*, то имеет место резонанс: камертон *B* колеблется сильно. Если же частота камертона *B* иная, то вынужденные колебания его будут настолько слабыми, что звука мы не услышим.

Рассмотрим теперь, какую роль играют ящики, на которых устанавливают камертоны. Проделаем ещё один опыт. Опустим в сосуд с водой широкую стеклянную трубку (рис. 81) и заставим звучать над её отверстием камертон. Вынимая трубку из воды, мы будем увеличивать столб воздуха в ней. При определённой длине столба воздуха в трубке мы услышим довольно сильный звук. Если продолжать вынимать понемногу трубку из воды, звук будет ослабевать и, наконец, перестанет быть слышимым.

Измерения показывают, что наименьшая длина резонирующего столба воздуха всегда равна $^1/_4$ длины волны данного звука.

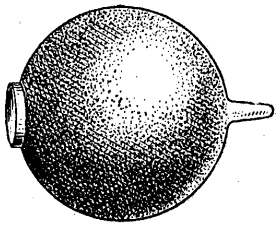


Рис. 82. Резонатор Гельмгольца.

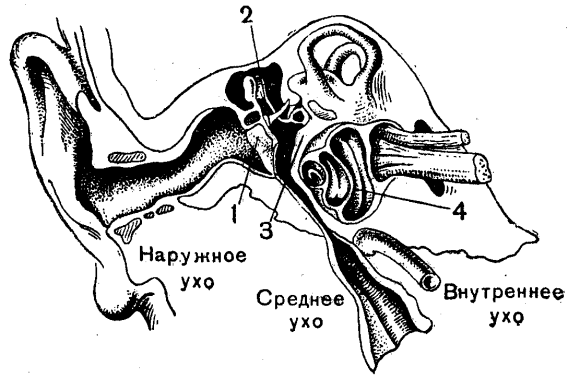


Рис. 83. Устройство уха человека.

Поэтому камертон устанавливается на резонансный ящик, который построен так, что длина его равна $^1/_4$ длины звуковой волны, возбуждаемой данным камертоном. При этих условиях столб воздуха в ящике колеблется в резонанс с колебаниями камертона, что и создаёт более сильную звуковую волну в окружающем воздухе, чем просто от одного только камертона.

Резонансом широко пользуются в музыкальных инструментах для усиления их звука.

Немецкий учёный Гельмгольц (1821—1894) построил особые резонаторы, каждый из которых отзывается только на один-единственный тон (рис. 82). Узким отверстием резонатор прикладывается к уху. Через широкое отверстие поступают в резонатор звуковые волны. Внутри резонатор полый. Собственный тон резонатора легко услышать, продувая струю воздуха около его широкого отверстия. В сложном звуке такой резонатор отзывается лишь на тон, совпадающий с его собственным тоном. Имея коллекцию таких резонаторов, можно проанализировать разные сложные звуки, издаваемые различными инструментами: струнными, духовыми, ударными, а также голосом. Удаётся таким способом выделять также отдельные тоны из различных шумов.

Резонаторы имеются и в нашем голосовом аппарате. Источники звука в голосовом аппарате — голосовые связки. Они приходят в колебание благодаря продуванию воздуха из лёгких и возбуждают звук, основной тон которого зависит от их натяжения. Этот звук богат обертонами. Гортань усиливает те из обертонов, частота колебаний которых близка к её собственной частоте. Дальше звуковые волны попадают в полость рта. Для произношения каждой гласной необходимо особое положение губ, языка и определённая форма резонаторной полости во рту.

46. Физика уха. Ухо представляет собой сложный звукоприёмный аппарат, работающий в чрезвычайно широком диапазоне частот и амплитуд. Звуковые волны достигают нашего наружного уха — его ушной раковины, которая представляет собой рупор, собирающий звуковые волны. По наружному слуховому проходу звуковые волны достигают барабанной перепонки *1* (рис. 83), отделяющей наружное ухо от среднего. Под влиянием приходящих волн эта перепонка колеблется, совершая вынужденные колебания с частотой воспринимаемого звука. Колебания барабанной перепонки через посредство действующей как рычаг системы сочленённых косточек *2*: молоточка, наковальни и стремечка — передаются так называемому овальному окну *3*, закрывающему внутреннюю полость ушного лабиринта. Ушной лабиринт в той его части, где лежат чувствительные к механическому раздражению окончания слухового нерва, заполнен жидкостью — эндолимфой.

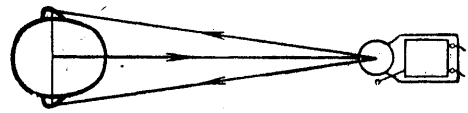


Рис. 84. Слушая двумя ушами, мы всегда можем повернуть голову так, что будем смотреть по направлению источника звука.

Внутри находится так называемая основная мембрана *4*, состоящая из нескольких тысяч (около 4500) волокон различной длины, настроенных каждое на некоторый определённый тон.

Пришедшие во внутреннее ухо звуковые волны обусловливают колебания тех волокон основной мембраны, которые настроены на частоты, содержащиеся в этих волнах.

Из приведённого выше описания слухового восприятия становится понятным, почему наше ухо способно различать отдельные тоны в сложном звуке, например в музыкальном аккорде.

Большое значение имеет то, что у нас не одно, а два одинаковых уха. Оценивая с помощью двух ушей силу звука, мы можем определить направление, по которому он до нас доходит. Когда же одно из наших ушей заложено ватой, мы не можем точно определить, откуда к нам несутся звуки. Слушая двумя ушами, мы всегда можем повернуть голову так, что будем смотреть по направлению источника звука (рис. 84).

47. Запись и воспроизведение звука. Возможность записывать звуки и затем воспроизводить их была открыта ещё в 1877 г. американским изобретателем Эдисоном. Звукозапись быстро вошла

в нашу жизнь. Мало теперь найдётся людей, которые бы не знали звуковоспроизводящих аппаратов — граммофонов [1] или их портативных образцов — патефонов. Благодаря возможности записывать и воспроизводить звуки появилось звуковое кино.

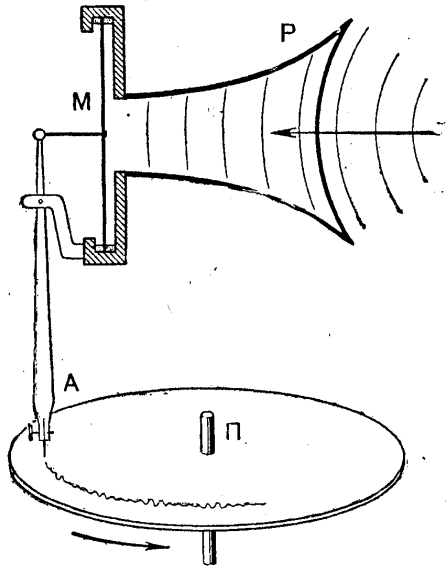


Рис. 85. Схема механической записи звука.

Запись музыкальных произведений, докладов, рассказов и даже целых пьес на патефонные пластинки стала массовой формой звукозаписи, рассчитанной на самый широкий круг потребителей.

Существует несколько систем звукозаписи. Из них механическая система, принцип которой был открыт Эдисоном, является до сих пор одной из основных. Эта система прошла большой путь развития, достигнув в наши дни высокого совершенства.

На рисунке 85 дана упрощённая схема механического звукозаписывающего устройства. Звуковые волны от источника (певца, оркестра и т. д.) попадают в рупор *Р*, в котором закреплена тонкая упругая пластинка *М*, называемая мембраной. Под действием этих волн мембрана колеблется. Колебания мембраны передаются связанному с ней резцу *А*, остриё которого чертит при этом на вращающемся диске *П* звуковую бороздку. Звуковая бороздка закручивается по спирали от края диска к его центру.

На рисунке 86 показан вид звуковых бороздок на пластинке (через лупу бороздки видны совершенно отчётливо).

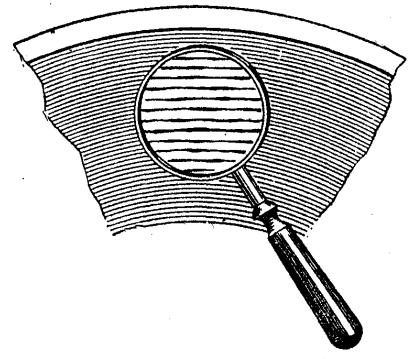


Рис. 86. Вид звуковых бороздок на пластинке.

Диск, на котором производится звукозапись, изготовляется из специального мягкого материала; обычно это восковой сплав, состоящий из ряда минеральных, растительных и животных восков, а также других органических веществ. С этого воскового диска снимают гальванопла

[1] Граммофон — от греч. слов: грамма — запись, фоне — звук.

стическим способом медную копию (клише), которой затем делают оттиски на дисках, изготовленных из особых материалов. Так получаются граммофонные пластинки.

При воспроизведении звука граммофонную пластинку ставят под иглу, связанную с мембраной граммофона, и приводят её во вращение.

Двигаясь по волнистой бороздке пластинки, конец иглы колеблется; вместе с ним колеблется и мембрана, причём эти колебания довольно точно воспроизводят записанный звук.

В настоящее время широкое распространение получила магнитная звукозапись с помощью специальных аппаратов (например, магнитофонов). Магнитная звукозапись настолько повысила качество воспроизведения звука, что стала превосходить все другие виды звукозаписи.

Упражнение 12.

1. Наблюдатель, стоя на расстоянии 200 *м* от отвесной скалы, производит отрывистый звук. Через сколько времени он услышит эхо? Скорость распространения звука принять равной 340 $\frac{м}{сек}$.

2. Два последовательных звука ощущаются нами раздельно лишь в том случае, если они разделены промежутком времени не менее $\frac{1}{10}$ *сек.* Определить наименьшее расстояние до преграды, на котором наблюдатель сможет слышать эхо. Скорость звука в воздухе принять равной 340 $\frac{м}{сек}$.

3. Охотник услышал эхо выстрела через $4\frac{1}{2}$ *сек.* На каком расстоянии от него находится поверхность, отражающая звук?

4. Определить длины звуковых волн в воздухе при 0° С самого низкого и самого высокого тона рояля.

5. Скорость звука в чугуне была определена впервые в Париже следующим образом. Из чугунной водопроводной трубы была выпущена вода; у одного конца трубы производился удар в колокол; у другого конца наблюдатель слышал два звука: сначала один, пришедший по чугуну, потом другой, пришедший по воздуху. Длина трубы была 931 *м*, а промежуток времени между приходом звуков был равен $2\frac{1}{2}$ *сек.* Найти отсюда скорость звука в чугуне; скорость звука в воздухе принять равной 340 $\frac{м}{сек}$.

ГЛАВА IV

ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

48. Давление. Сила давления. Механическое действие жидкостей и газов на поверхности тел, например на стенки сосудов, характеризуется величиной, называемой давлением. Понятие давления — одно из основных в механике жидкостей и газов.

Давлением называется величина, измеряемая отношением силы, действующей на поверхность, к площади этой поверхности.

Сила давления, как и всякая другая сила, есть результат взаимодействия тел; в любых случаях, будь то давление твёрдых тел на опоры, жидкостей на стенки сосудов, атмосферного воздуха на землю, мы имеем дело с взаимодействием тел.

Силы давления могут быть распределены по площади как равномерно, так и неравномерно. При равномерном распределении сил давления давление на всех участках поверхности одинаково. В этом случае давление можно рассчитать по формуле:

$$p = \frac{F}{S},$$

где p — давление, F — сила давления и S — площадь.

Если, например, на поршень гидравлического пресса площадью 50 $см^2$ действует сила 200 $кГ$, то на каждый квадратный сантиметр действует сила 4 $кГ$ и давление $p = 4 \frac{кГ}{см^2}$.

За единицу давления принимается такое давление, при котором на единицу площади действует единица силы.

Приняв за единицу силы 1 дину, за единицу площади 1 $см^2$, получим единицу давления в системе СГС: $1 \frac{дин}{см^2}$. В системе СИ единицей давления будет ньютон на квадратный метр $\left(\frac{н}{м^2}\right)$. Часто за единицу давления принимается нормальная атмосфера, равная давлению ртутного столба высотой 760 *мм* при 0° С. Определим давление, которое оказывает ртутный столб высотой 760 *мм* при 0° С на 1 $см^2$ поверхности. Оно численно равно весу столба ртути сечением 1 $см^2$ и высотой 76 *см* (760 *мм*).

Зная, что удельный вес ртути равен $13{,}59\ \frac{Г}{см^2}$, выразим нормальную атмосферу через давление в $\frac{Г}{см^2}$, $\frac{кГ}{см^2}$ и $\frac{н}{м^2}$:

$$p = 76\ см \cdot 13{,}59\ \frac{Г}{см^3} \approx 1033\ \frac{Г}{см^2} = 1{,}033\ \frac{кГ}{см^2} \approx 1 \cdot 10^5\ \frac{н}{м^2}.$$

В технике за единицу давления обычно принимают $1\ \frac{кГ}{см^2}$ — это техническая атмосфера.

Зная величину давления и площадь поверхности, по формуле $p = \frac{F}{S}$ можно найти силу давления: $F = p \cdot S$.

49. Наблюдение движения жидкости. Под действием различных сил жидкости и газы могут находиться или в равновесии, или в движении. Законы равновесия жидкостей и газов были изучены в начальном курсе физики, теперь же мы рассмотрим некоторые явления, связанные с их движением.

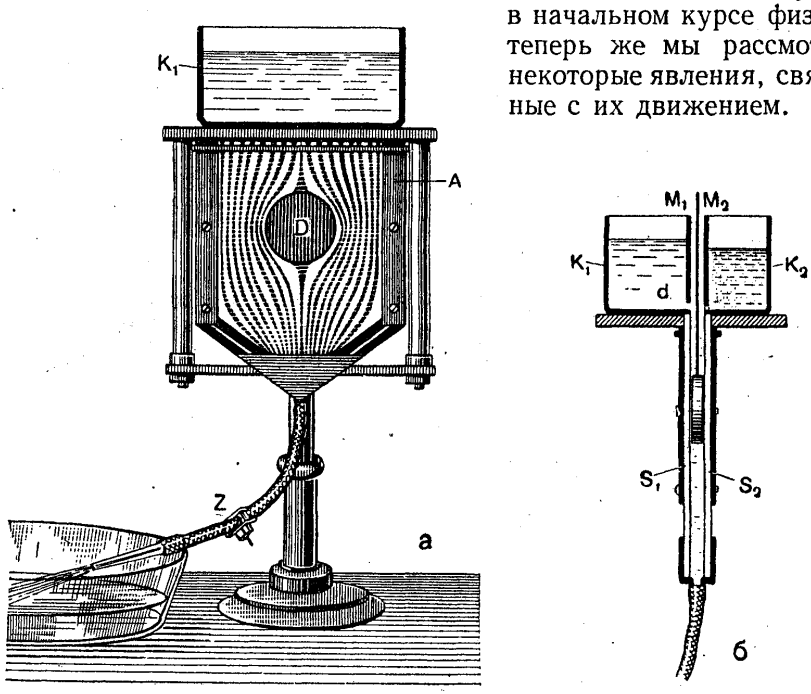


Рис. 87. Прибор для наблюдения движения жидкости:
а — вид спереди; *б* — вид сбоку.

Несмотря на различие между жидкостями и газами, некоторые законы их движения одинаковы. Это обстоятельство весьма благоприятно, так как движение жидкости легче сделать заметным и, следовательно, легче изучить, чем движение газа.

Для исследования движения жидкости применяются специальные приборы. На рисунке 87, *а* изображён вид одного такого прибора спереди, а на рисунке 87, *б* — вид сбоку.

Прибор состоит из плоского стеклянного сосуда A (рис. 87, *а*), образованного двумя стеклянными пластинками S_1 и S_2 (рис. 87, *б*), расстояние между которыми порядка 1 *мм*. Сверху к этим стеклянным пластинкам плотно пригнаны металлические пластинки M_1 и M_2, к которым приделаны камеры K_1 и K_2. Каждая камера сообщается с пространством между пластинками через ряд отверстий, просверлённых в пластинках M_1 и M_2. (Одно такое отверстие d показано в пластинке M_1.) Отверстия в этих пластинках сдвинуты друг относительно друга.

В камеру K_1 наливается чистая вода, а в камеру K_2 — вода, подкрашенная чернилами.

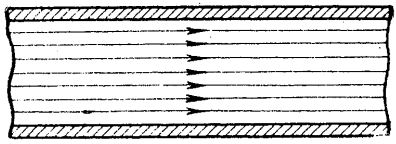


Рис. 88. В трубе одинакового сечения по всей длине линии тока параллельны друг другу и распределены одинаково густо.

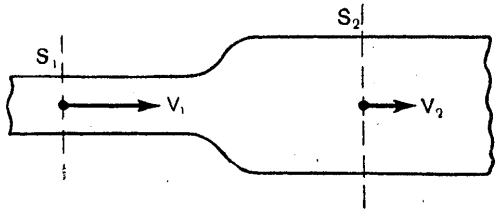


Рис. 89. При стационарном течении скорости движения частиц жидкости обратно пропорциональны площадям сечения трубы.

В начале опыта уровень воды в камере K_1 несколько выше, чем в камере K_2. Если открыть зажимной кран Z, закрывающий резиновую трубку для отвода воды (рис. 87, *а*), то в пространство между стеклянными пластинками S_1, S_2 потечёт сначала чистая вода из камеры K_1. Но как только уровни воды в камерах сравняются, в прибор начнёт проникать и подкрашенная вода в виде тонких окрашенных струек. Эти струйки располагаются вдоль линий, которые называются л и н и я м и т о к а.

Если поместить в середину между пластинами S_1 и S_2 круглый диск D, представляющий сечение шара или цилиндра, то можно наблюдать картину линий тока вокруг этого тела. Такая картина изображена на рисунке 87, *а*.

При помощи линий тока можно графически изображать величину скорости течения жидкости и газа. *В тех местах, где скорость больше, линии тока проводятся гуще и, наоборот, где скорость меньше, линии тока проводятся реже.*

50. Стационарное движение жидкости. Если по трубе течёт жидкость неразрывной струёй, то через любое поперечное сечение трубы за равные промежутки времени проходят одинаковые объёмы жидкости. Такое движение жидкости называется с т а ц и о н а р н ы м [1] (установившимся) движением.

[1] С т а ц и о н а р н ы й (от лат. с т а ц и о н а р у с) — постоянный, неизменяющийся.

Стационарное движение может иметь место в реках, в водопроводных трубах или при вытекании воды из большого резервуара.

В трубе одинакового сечения по всей её длине скорости движения частиц жидкости одинаковые (при отсутствии трения); поэтому линии тока параллельны друг другу и распределены всюду одинаково густо (рис. 88). При движении же вдоль трубы с неодинаковым сечением скорости эти различны.

Обозначим скорость течения жидкости в сечении S_1 трубы через v_1, а в сечении S_2 — через v_2 (рис. 89). При установившемся течении объём жидкости, протекающей в 1 *сек* через поперечное сечение трубы S_1, равен объёму жидкости, протекающей через сечение S_2 этой же трубы; поэтому можно написать:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2,$$

откуда следует, что $\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$ т. е. ***при стационарном течении скорости движения частиц жидкости обратно пропорциональны площадям сечения трубы.***

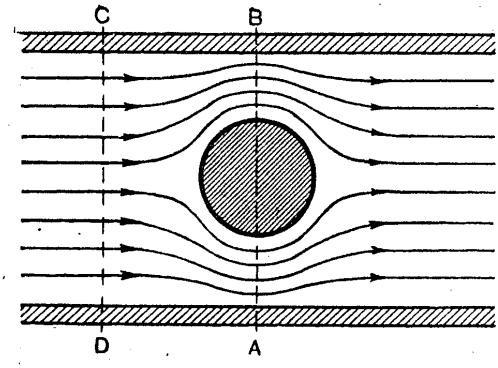


Рис. 90. Распределение линий тока при обтекании жидкостью цилиндра.

На рисунке 90 показано обтекание жидкостью цилиндра. При встрече с цилиндром линии тока изгибаются. В сечении *CD* скорость частиц жидкости меньше, линии тока здесь реже. В сечении же *AB* скорости частиц жидкости больше и линии тока гуще. Всё изложенное относится в равной степени и к движению газов.

Упражнение 13.

1. В каких местах реки течение быстрее: в узких или широких? Объясните почему.
2. На основании каких признаков можно считать течение воды в реке стационарным? Всегда ли это бывает?
3. Почему нельзя поток людей, выходящих из театра или кино после окончания представления или картины, считать установившимся?

51. Давление в движущейся жидкости. В текущей жидкости различают статическое давление и динамическое давление. Причиной статического давления, как и в случае неподвижной жидкости, является сжатие жидкости. Статическое давление проявляется в напоре на стенку трубы, по которой течёт жидкость.

Динамическое давление обусловливается скоростью течения жидкости. Чтобы обнаружить это давление, надо затормозить жидкость, и тогда оно, как и статическое давление, проявится в виде напора.

Сумма статического и динамического давлений называется полным давлением.

В покоящейся жидкости динамическое давление равно нулю, следовательно, статическое давление равно полному давлению и может быть измерено любым манометром.

Измерение давления в движущейся жидкости сопряжено с целым рядом трудностей. Дело в том, что манометр, погружённый в движущуюся жидкость, изменяет скорость движения жидкости в том месте, где он находится. При этом, конечно, изменяется и величина измеряемого давления. Чтобы манометр, погружённый в жидкость, совсем не изменял скорости жидкости, он должен двигаться вместе с жидкостью. Однако измерять таким путём давление внутри жидкости крайне неудобно. Это затруднение обходят, придавая трубке, соединённой с манометром, обтекаемую форму, при которой она почти не изменяет скорости движения жидкости (рис. 91). Практически для измерений давлений внутри движущейся жидкости или газа применяют узкие манометрические трубки (рис. 92).

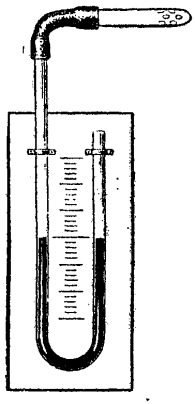


Рис. 91. Трубка обтекаемой формы соединена с манометром.

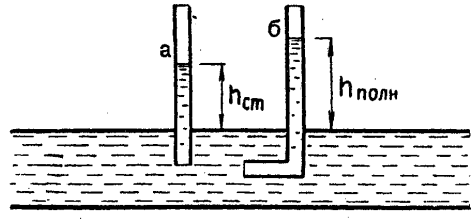


Рис. 92. Измерение давления в движущейся жидкости.

Статическое давление измеряется с помощью манометрической трубки, плоскость отверстия которой расположена параллельно линиям тока так, как показано на рисунке 92, *а*. Если жидкость в трубе находится под давлением, то в манометрической трубке жидкость поднимается на некоторую высоту, соответствующую статическому давлению в данном месте трубы.

Полное давление измеряют трубкой, плоскость отверстия которой расположена перпендикулярно линиям тока (рис. 92, *б*). Такой прибор называется трубкой Пито. Попав в отверстие трубки Пито, жидкость останавливается. Высота столба жидкости ($h_{полн}$) в манометрической трубке будет соответствовать полному давлению жидкости в данном месте трубы.

В дальнейшем нас будет интересовать только статическое давление, которое мы будем называть просто давлением внутри движущейся жидкости или газа.

Если измерить статическое давление в движущейся жидкости в различных частях трубы переменного сечения (рис. 93), то окажется, что в узкой части трубы оно меньше, чем в широкой её части.

Но скорости течения жидкости обратно пропорциональны площадям сечения трубы; следовательно, давление в движущейся жидкости зависит от скорости её течения.

В местах, где жидкость движется быстрее (узкие места трубы), давление меньше, чем там, где эта жидкость движется медленнее (широкие места трубы).

Этот факт можно объяснить на основе общих законов механики.

Допустим, что жидкость переходит из широкой части трубки в узкую. При этом частицы жидкости увеличивают скорости, т. е.

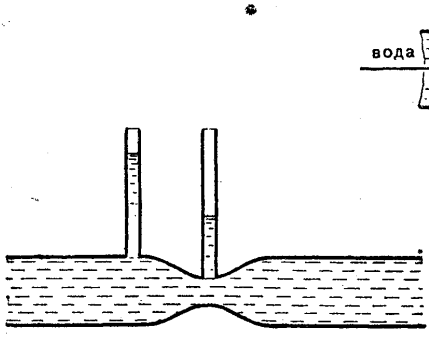


Рис. 93. Давление в движущейся жидкости в узкой части канала меньше давления в широкой его части.

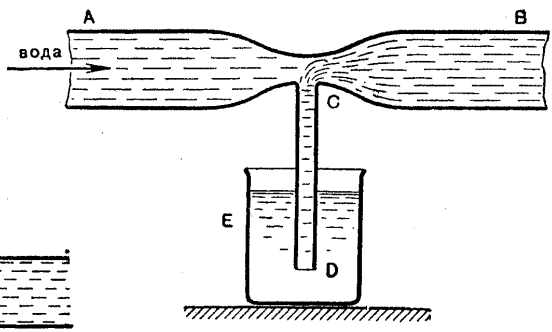


Рис. 93а. Установка для наблюдения всасывающего действия струи жидкости.

движутся с ускорениями в направлении движения. Пренебрегая трением, на основе второго закона Ньютона можно утверждать, что равнодействующая сил, действующих на каждую частицу жидкости, также направлена в сторону движения жидкости. Но эта равнодействующая сила создаётся силами давления, которые действуют на каждую данную частицу со стороны окружающих её частиц жидкости, и направлена вперёд, по направлению движения жидкости. Значит, сзади на частицу действует большее давление, чем спереди. Следовательно, как показывает и опыт, давление в широкой части трубки больше, чем в узкой.

Если жидкость течёт из узкой в широкую часть трубки, то, очевидно, в этом случае частицы жидкости тормозятся. Равнодействующая сил, действующих на каждую частицу жидкости со стороны окружающих её частиц, направлена в сторону, противоположную движению. Эта равнодействующая определяется разностью давлений в узком и широком каналах. Следова-

тельно, частица жидкости, переходя из узкой в широкую часть трубки, движется из мест с меньшим давлением в места с бо́льшим давлением.

Итак, ***при стационарном движении в местах сужения каналов давление жидкости понижено, в местах расширения — повышено.***

Графически, как было указано в § 49, скорости течения жидкости принято изображать густотой расположения линий тока. Поэтому в тех частях стационарного потока жидкости, где давление меньше, линии тока должны быть расположены гуще и, наоборот, где давление больше, линии тока расположены реже. То же относится и к изображению потока газа.

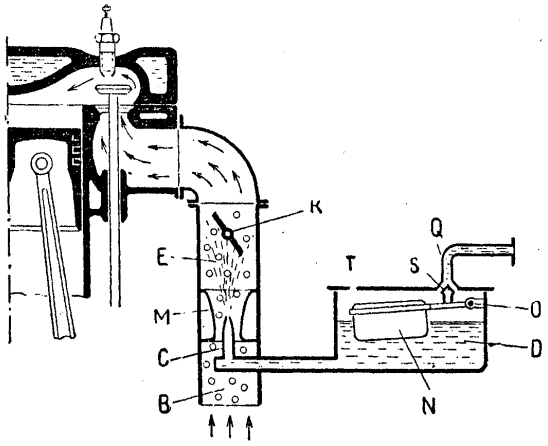


Рис. 94а. Устройство карбюратора.

52. Всасывающее действие струи жидкости и его практическое использование. Сужая в каком-либо месте поперечное сечение трубки, по которой течёт жидкость или газ, можно сделать давление в этом месте значительно меньше атмосферного. Получающаяся при этом всасывающая сила используется в технике в устройстве некоторых приборов.

Представление о действии таких приборов даёт установка, изображённая на рисунке 93а.

К стеклянной трубке AB в её узком сечении припаяна манометрическая трубочка CD, свободный конец которой D опущен в сосуд E с подкрашенной водой. Соединяя трубку AB с водопроводом, создают в ней поток жидкости. При определённой скорости течения жидкости давление в узкой части трубки AB становится меньше атмосферного; при этом подкрашенная жидкость из сосуда E поднимается вверх по трубочке CD и вливается в поток жидкости, текущей по AB.

Важное применение всасывающее действие струи находит в карбюраторе — приборе, предназначенном для питания двигателя внутреннего сгорания горючей смесью.

Устройство простейшего карбюратора изображено на рисунке 94а. Во время всасывающих ходов поршня двигателя наружный воздух проходит снизу вверх по трубе B, которая имеет суженную часть — диффузор M. В диффузоре помещена трубка C, через которую поступает бензин из поплавковой камеры D в смесительную камеру E.

Чтобы расход бензина через распылительную трубку *C* был строго ограничен, в трубке помещают жиклёр — деталь с малым калиброванным (очень точного размера) отверстием.

При понижении уровня топлива в поплавковой камере *D* поплавок *N* опускается, вращаясь вокруг оси *O*, а верхний конец запорной иглы *S* отходит от своего седла. Топливо начинает поступать в поплавковую камеру через канал *Q*. Поплавок всплывает, и в определённый момент запорная игла плотно закрывает отверстие для поступления бензина.

Бензин в поплавковой камере всегда находится под атмосферным давлением благодаря отверстию *T* в крышке камеры. Поплавковая камера *D* и трубка *C* — сообщающиеся сосуды. Если уровень бензина в камере ниже или равен высоте трубки *C*, то бензин не выливается. Но когда воздух проходит через диффузор, давление около трубки *C* уменьшается; появляется разность давлений воздуха в поплавковой камере (там оно равно атмосферному) и в диффузоре. Под действием разности давлений бензин выталкивается из трубки *C* и распыляется в потоке воздуха; образуется рабочая смесь, которая увлекается через регулирующую поток заслонку *K* в цилиндр двигателя.

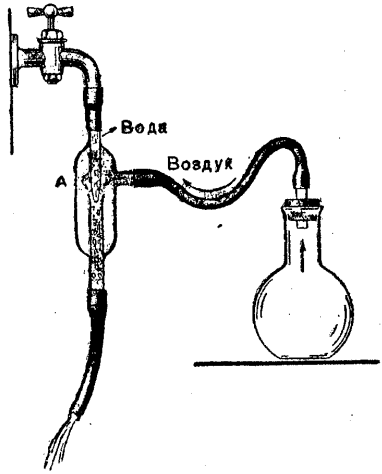


Рис. 94б. Схема устройства водоструйного насоса.

На рисунке 94б изображена схема устройства водоструйного насоса, где также используется всасывающее действие струи жидкости. Вода из водопровода проходит через узкий участок трубки *A*, в котором скорость её движения сильно возрастает, вследствие чего давление там становится меньше атмосферного. Благодаря этому через трубку, связанную с воздушным резервуаром, засасывается воздух до тех пор, пока его давление в резервуаре не становится равным давлению в суженной части трубки *A*. Эвакуированный из резервуара воздух уносится протекающей водой.

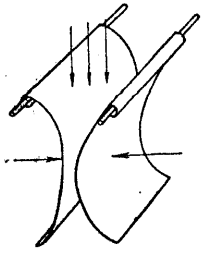


Рис. 95. К упражнению 2, § 52.

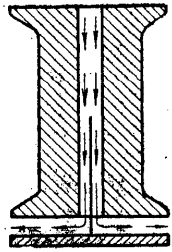


Рис. 96. К упражнению 3, § 52.

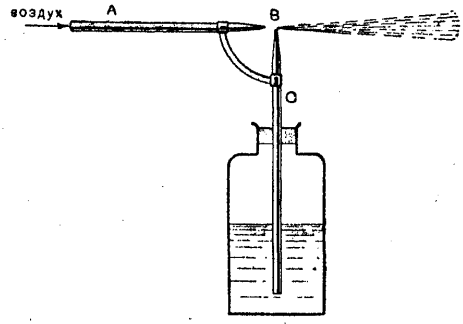


Рис. 97. Схема устройства пульверизатора.

Упражнение 14.

1. Подвесьте две консервные банки с водой на длинных нитях, расположив их на расстоянии 1—2 *см* друг от друга. Затем сильно подуйте между ними, банки при этом притянутся друг к другу. Объясните явление.

2. Возьмите два прямоугольных куска жёсткой бумаги и, изогнув их, как показано на рисунке 95, повесьте на вязальные спицы. Затем подуйте между этими кусками бумаги сверху. Куски бумаги при этом будут сближаться.

Проделайте опыт и объясните наблюдаемое явление.

3. Изготовьте небольшой лёгкий картонный кружок. Приблизьте к этому кружку катушку, как показано на рисунке 96, и сильно подуйте в отверстие катушки. Вы заметите, что кружок притянется к катушке.

Проделайте такой опыт и объясните наблюдаемое явление.

4. На рисунке 97 изображён прибор, называемый пульверизатором. Если вдувать в трубку *A* воздух, то жидкость по трубке *CB* будет подниматься и при выходе из трубки распыляться.

Изготовьте сами такой прибор, проделайте с ним опыт и объясните его действие.

53. Внутреннее трение в жидкостях и газах. Мы знаем, что если одно тело скользит или катится по поверхности другого, то возникает сила трения, тормозящая движение тела.

Если оба соприкасающихся тела движутся, то сила трения замедлит скорость одного тела, которое движется быстрее, и увеличит скорость движущегося более медленно.

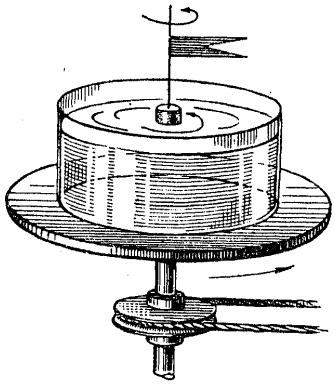


Рис. 98. Установка для наблюдения внутреннего трения в жидкостях.

Можно на опыте убедиться, что и между слоями газа и жидкости, движущимися относительно друг друга, также возникают силы, замедляющие движение одних слоёв и ускоряющие движение других. Эти силы называют силами внутреннего трения или силами вязкости.

Внутреннее трение в жидкости можно наблюдать при помощи установки, изображённой на рисунке 98. На поверхности воды, налитой в широкий сосуд, плавает небольшой деревянный цилиндр с флажком. Если привести во вращение сосуд, то спустя некоторое время вследствие внутреннего трения придёт во вращение и цилиндр с флажком. При остановке сосуда цилиндр вследствие инерции будет продолжать движение, но существующие в жидкости силы внутреннего трения постепенно уменьшат его скорость до нуля. Аналогичным образом можно обнаружить наличие внутреннего трения в газах (рис. 99). Если вращать диск *A*, то вскоре приходит в движение и верхний диск *B*, неподвижно висевший над первым диском.

Вращающийся диск вовлекает в движение ближайший к его поверхности слой воздуха, который благодаря внутреннему

трению газа приводит в движение более удалённые слои газа. Таким путём движение непрерывно передаётся от одного слоя газа к другому и, наконец, захватывает верхний диск, и он приходит в движение.

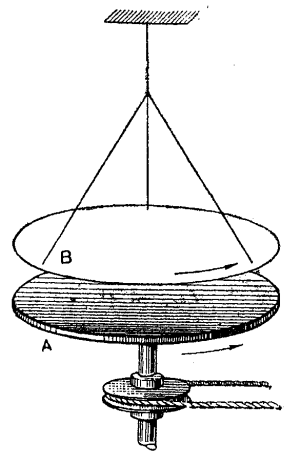


Рис. 99. Установка для наблюдения внутреннего трения в газах.

Упражнение 15.

1. В каком месте трубы переменного сечения текущая вода движется с наибольшей скоростью, в каком с наименьшей?
2. Где скорость воды в реке больше: у берегов или посередине реки? Вблизи поверхности воды или на глубине? Объясните почему.
3. Какая из жидкостей более вязкая: вода или глицерин? Ответ обоснуйте.

54. Сопротивление при движении тела в жидкости и газе. Из опыта мы знаем, что когда тело движется в жидкости, то последняя тормозит движение; следовательно, при этом возникает сила, препятствующая движению тела. Если, например, с берега спокойного озера столкнуть в воду лодку, то она вследствие инерции пройдёт некоторое расстояние, а затем остановится. Сила сопротивления воды, действующая на лодку, останавливает её. В равной степени это относится к движению тела в газе, например к движению автомобиля, велосипеда, самолёта и других тел в воздухе.

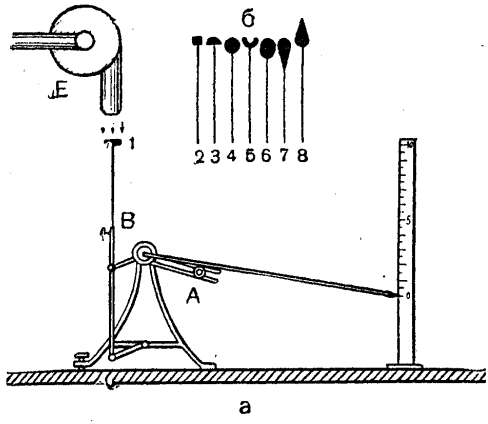


Рис. 100. Аэродинамические весы.

Силу, препятствующую движению тела в воздухе, называют аэродинамическим (воздушным) сопротивлением. Установлено, что величина аэродинамического сопротивления не зависит от того, движется ли тело в воздухе или, наоборот, неподвижное тело обтекается воздухом.

Выясним, от чего зависит величина аэродинамического сопротивления. Для этого воспользуемся установкой, изображённой на рисунке 100, *а*.

Основная часть этой установки — специальной конструкции аэродинамические весы. В стержне весов *B* имеется гнездо, куда вставляются тела различных форм и размеров. Приведение указателя весов к нулю в начале опыта производится

путём перемещения груза *A*. Движение воздуха создаётся особым электрическим вентилятором *E*. Изменяя величину тока в электродвигателе, можно получать потоки воздуха различной скорости. Тела *1—8* (рис. 100, *б*), аэродинамическое сопротивление которых исследуется, имеют одинаковый вес. Все они, за исключением тела *2*, имеют одинаковую лобовую площадь (площадь наибольшего сечения тела в направлении, перпендикулярном движению).

Укрепив в гнезде весов *B* круглый диск *1* и изменяя скорость потока воздуха, можно показать, что сопротивление будет тем больше, чем больше скорость потока воздуха. Проведя такой же опыт с диском меньшего диаметра, устанавливаем, что при одинаковых скоростях воздуха сопротивление диска меньшего размера будет меньше; сопротивление шара меньше, чем сопротивление диска такого же диаметра, несмотря на то что их лобовая площадь одинакова. Особенно велико сопротивление полушара, обращённого вогнутой стороной навстречу потоку. Поэтому форма полушара используется в парашютах.

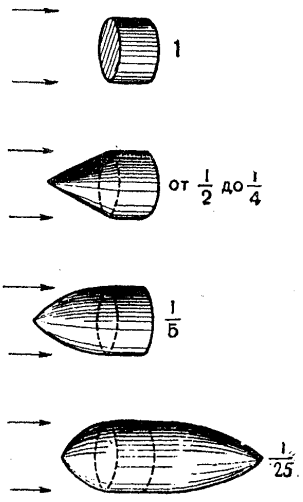


Рис. 101. Влияние формы тела на величину аэродинамического сопротивления.

Все эти опыты позволяют сделать заключение, что аэродинамическое сопротивление зависит от скорости воздуха относительно тела, от формы тела и от величины лобовой площади.

Влияние формы тела на величину аэродинамического сопротивления наглядно показано на рисунке 101. За единицу принято сопротивление цилиндра. Конусообразная насадка к нему уменьшает сопротивление от $\frac{1}{2}$ до $\frac{1}{4}$, в зависимости от угла конуса. Гранатообразная насадка доводит сопротивление до $\frac{1}{5}$. Наконец, если придать цилиндру форму, близкую к форме падающей капли или рыбы, то сопротивление понижается до $\frac{1}{25}$.

55. Обтекание тела жидкостью или газом. Наиболее обтекаемо такое тело, которое при данной лобовой площади имеет наименьшее сопротивление.

Форма тела, закруглённого спереди и заострённого сзади, возможно более гладкая, без выступов, является наиболее обтекаемой. Такую форму придают снарядам, подводным лодкам, торпедам, гоночным автомобилям, корпусу и крыльям самолёта, подводным частям судов.

На рисунке 102 изображён автомобиль обтекаемой формы.

Выясним теперь, какими физическими процессами определяется уменьшение сопротивления движению тела, которому придана обтекаемая форма.

Для этого будем помещать в поток жидкости тела различной формы и, меняя скорость потока, наблюдать картины линий тока, получившиеся при обтекании жидкостью этих тел.

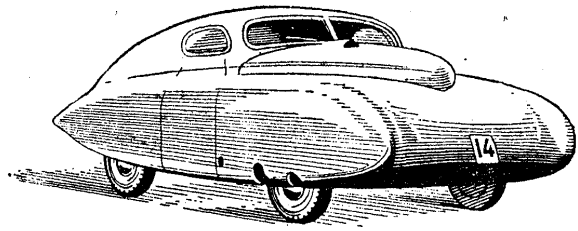


Рис. 102. Обтекаемой формы гоночный автомобиль.

На рисунке 103 изображена картина линий тока жидкости, получившаяся при обтекании ею цилиндра с различной скоростью. При малых скоростях обтекания (рис. 103, *а*) линии тока, обойдя цилиндр, располагаются позади него так же, как и перед ним. По мере же увеличения скорости обтекания жидкость позади цилиндра приходит в круговое вихревое движение (рис. 103, *б*).

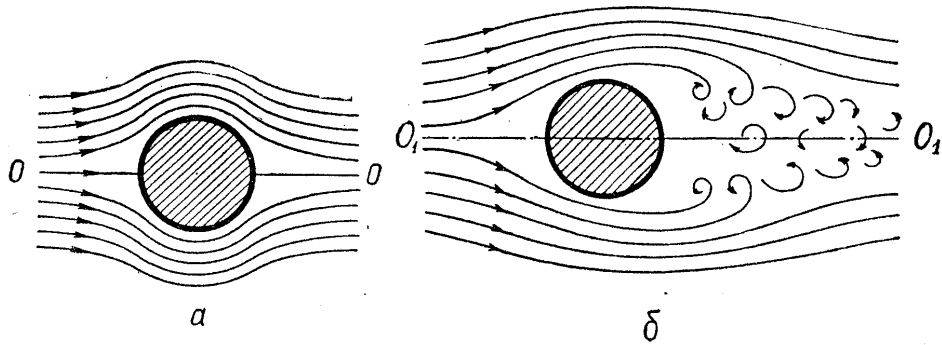


Рис. 103. Обтекание цилиндра жидкостью: *а* — при малых скоростях обтекания; *б* — при увеличении скорости обтекания жидкость позади цилиндра приходит в круговое вихревое движение.

Жидкость, вращающаяся в вихре, движется быстрее жидкости в стационарном потоке. Но мы знаем (§ 52), что давление в жидкости тем меньше, чем быстрее она движется (вспомните всасывающее действие струи жидкости). Следовательно, с задней стороны цилиндра, где образовались вихри, давление становится меньше, чем с передней. Разность давлений впереди и позади движущегося тела и создаёт сопротивление движению тела.

К этому сопротивлению присоединяется ещё сопротивление, обусловленное внутренним трением; оно выражается в том, что движущееся тело увлекает за собой слои жидкости. Однако измерения показывают, что это сопротивление мало, и при больших скоростях существенного значения оно не имеет.

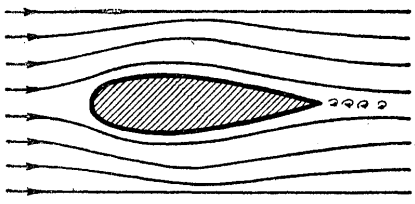


Рис. 104. Линии тока вокруг тела обтекаемой формы. Позади этого тела вихри почти не образуются.

Итак, *главнейшей причиной, обусловливающей сопротивление жидкости движению тела, является образование вихрей позади движущегося тела*, обусловленное также вязкостью жидкости. Поэтому для уменьшения этого сопротивления надо придать телу такую форму, при которой завихрение жидкости получается наименьшим.

Тело обтекаемой формы обладает малым сопротивлением потому, что жидкость всюду прилегает к его поверхности и позади него не завихрена.

На рисунке 104 изображена картина линий тока вокруг тела обтекаемой формы. Сзади такого тела вихри почти не образуются.

56. **Подъёмная сила.** При движении тел в воздухе, кроме сопротивления движению, возникают и другие силы. Особенно важное значение имеет так называемая подъёмная сила.

Птица свободно реет в воздухе. Подстреленная, она камнем падает на землю. Почему? Какая сила удерживает птицу в воздухе?

Этот вопрос с древнейших времён занимал человека. Люди давно мечтали об искусственных крыльях, которые позволили бы им, подобно птицам, свободно пересекать большие пространства за короткие промежутки времени. Однако прошло много времени, прежде чем эта мечта нашла своё воплощение в самолёте.

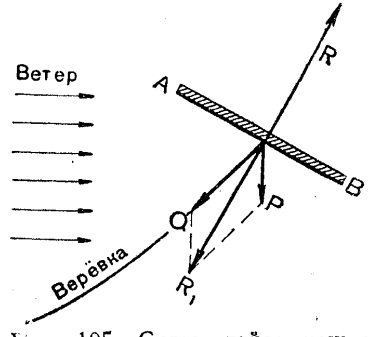


Рис. 105. Силы, действующие на бумажный змей AB при его полёте.

Прежде чем рассматривать вопрос о подъёмной силе крыла самолёта, обратимся к простому примеру, который ясно показывает, как вообще может возникнуть подъёмная сила при движении тела в воздухе. Посмотрим, какие силы действуют на бумажный змей, удерживаемый на ветру верёвкой (рис. 105).

Воздушный поток, отражаясь от поверхности змея AB, действует на него с силой R. Кроме того, на змей действуют сила его собственного веса P и натяжение верёвки Q; результирующая этих сил R_1. При равенстве сил R и R_1 змей держится в воз-

духе; если же сила R будет больше R_1, то змей будет подниматься. Таким образом, воздушный змей, отклоняя горизонтальный поток воздуха косо вниз, сам испытывает со стороны воздуха силу, направленную вверх и обеспечивающую его полёт.

Значительно сложнее и иначе, чем в случае со змеем, обстоит дело с подъёмной силой, действующей на крыло самолёта при его полёте.

Сечение крыла самолёта показано на рисунке 106. Практика показала, что для осуществления подъёма крыло самолёта должно быть расположено так, чтобы имелся некоторый угол α между его нижней линией и направлением полёта [1].

При горизонтальном полёте угол α не превышает 1—1°,5, при посадке — около 15°. Оказывается, что при наличии такого угла скорость потока воздуха, обтекающего крыло сверху, будет больше, чем скорость потока, обтекающего нижнюю поверхность крыла. На рисунке 106 эта разность скоростей отмечена разной густотой линий тока.

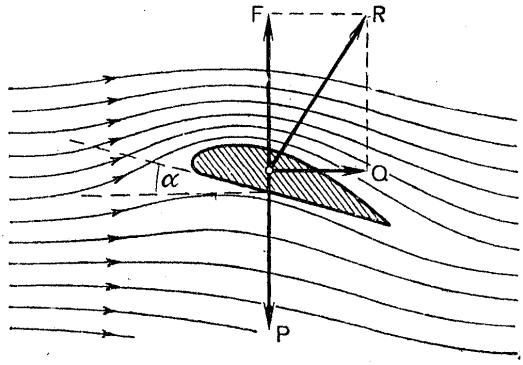


Рис. 106. К возникновению подъёмной силы крыла самолёта.

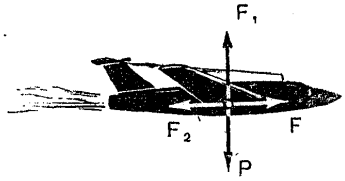


Рис. 107. Силы, действующие на самолёт при горизонтальном равномерном полёте.

Но, как указывалось в § 51, в том месте потока, где скорость больше, давление меньше, и наоборот. Поэтому при движении самолёта в воздухе над верхней поверхностью крыла будет пониженное давление, а над нижней — повышенное давление. Эта разность давления и обусловливает действие на крыло силы R, направленной вверх (рис. 106).

Вертикальная слагающая этой силы — сила F — представляет собой подъёмную силу, направленную против веса тела P. Если эта сила больше веса самолёта, последний будет подниматься вверх. Вторая слагающая Q представляет собой лобовое сопротивление; оно преодолевается тягой винта.

На рисунке 107 изображены силы, действующие на самолёт при горизонтальном равномерном полёте: F_1 — подъёмная сила, P — вес самолета, F_2 — лобовое сопротивление и F — сила тяги винта.

[1] Этот угол изменяется действием руля высоты.

Конструирование и расчёт самолётов производятся на основе аэродинамической теории. В разработку этой теории большой вклад внесли наш замечательный учёный Н. Е. Жуковский и его ученики.

Жуковский Николай Егорович (1847—1921) — замечательный русский учёный, основоположник современной гидро- и аэромеханики, «отец русской авиации» (так назвал его В. И. Ленин). Он дал формулу для определения подъёмной силы самолёта, которая лежит в основе расчётов при постройке самолётов. Жуковскому принадлежат важные исследования закономерностей движения жидкости, которые получили широкое практическое применение.

Ещё на заре развития авиации Жуковский говорил: «Человек не имеет крыльев и по отношению веса своего тела к весу мускулов в 72 раза слабее птицы. Но я думаю, что он полетит, опираясь не на силу своих мускулов, а на силу своего разума». Прошло немного времени, и эти пророческие слова оправдались.

Наша страна много сделала для развития авиации. Первый самолёт был построен русским офицером А. Ф. Можайским. Мировое первенство в области многих авиационных достижений в настоящее время принадлежит нашей Родине.

Велико значение авиации в хозяйственной жизни страны. Тысячи самолётов летают над нашей страной, связывая отдалённейшие уголки её с хозяйственными и культурными центрами страны, перевозя грузы и пассажиров.

Упражнение 16.

1. Изготовьте небольшой бумажный цилиндр длиной 15—20 *см* и диаметром 4—5 *см* и приклейте к его концам несколько большего диаметра диски. Намотайте на цилиндр часть ленты (длиной 0,5—0,75 *м*), а свободный конец ленты привяжите к концу палочки. Положите цилиндр на стол и быстро проведите концом палочки слева направо (рис. 108). Цилиндр покатится по столу, взлетит вверх, а потом уже упадёт.

Проделайте такой опыт и объясните взлёт цилиндра.

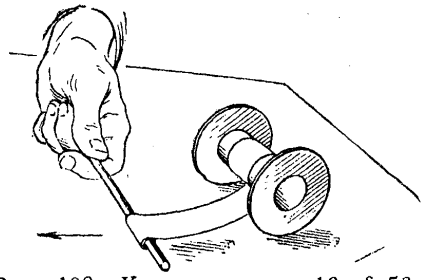


Рис. 108. К упражнению 16, § 56.

2. Положите цилиндр, описанный в предыдущем упражнении, на стол так, чтобы навитая на цилиндр лента при рывке цилиндра в горизонтальном направлении сходила с него не снизу, как на рисунке 108, а сверху. Проследите за движением цилиндра, опишите и объясните его.

57. Использование энергии движущейся воды. Уже много тысяч лет человечество использует энергию движущейся воды для самых разнообразных целей.

Запасы водной энергии на Земле огромны. По предварительным подсчётам, только гидроэнергоресурсы Советского Союза определяются примерно в 300 млн. киловатт, что в переводе на выработку электрической энергии может дать не менее 2000 млрд. киловатт-часов ежегодно.

Великим «круговоротом воды» мы обязаны солнечному излучению. Вода озёр, морей и океанов испаряется и, поднимаясь вверх, образует облака и тучи, из которых она в виде дождя и снега падает на поверхность Земли и в форме ручьёв, рек и потоков течёт в моря и океаны, где снова испаряется. Каждый горный поток, каждый ручей, каждая река образует источник энергии, который может быть так или иначе использован.

Несмотря на то что запасы водной энергии огромны и люди стали пользоваться ими давно, только сравнительно недавно водная энергия приобрела огромное значение в промышленности, получив название «белого угля». Особенно большое внимание проблеме использования энергии «белого угля» уделено в Советском Союзе.

Советский Союз поставил одной из первоочередных задач в области энергетики задачу максимального использования энергии «белого угля» путём создания мощных гидроэлектроустановок на десятки, сотни тысяч и даже миллионы киловатт. И эта задача благодаря социалистическому строю нашей страны успешно разрешается. В настоящее время у нас действует ряд крупнейших гидроэлектростанций: Днепровская гидроэлектростанция имени В. И. Ленина мощностью 648 000 *квт*; Цимлянская гидроэлектростанция на Дону мощностью 160 000 *квт*; Волжская гидроэлектростанция имени В. И. Ленина мощностью 2 300 000 *квт*. Завершено строительство Волжской имени XXII съезда КПСС гидроэлектростанции мощностью 2 530 000 *квт* и Братской на Ангаре мощностью 4 500 000 *квт*. Строятся мощные гидроэлектростанции на Иртыше, Енисее, Оби и других реках.

58. Гидравлические двигатели. Как известно из механики, каждое тело, поднятое над землёй, обладает потенциальной энергией. Это в равной степени относится и к воде.

Если, например, имеется какой-нибудь запас воды m, поднятой относительно некоторого уровня на высоту h, то эта вода обладает относительно этого уровня потенциальной энергией mgh. Если эта вода упадёт с высоты h, то частицы её приобретут скорость v, определяемую из равенства $v = \sqrt{2gh}$. Потенциальная энергия воды при этом превратится в кинетическую энергию $\frac{mv^2}{2}$. Если не принимать во внимание незначительные потери энергии, неизбежные при этом переходе, то можно написать, что $mgh = \frac{mv^2}{2}$.

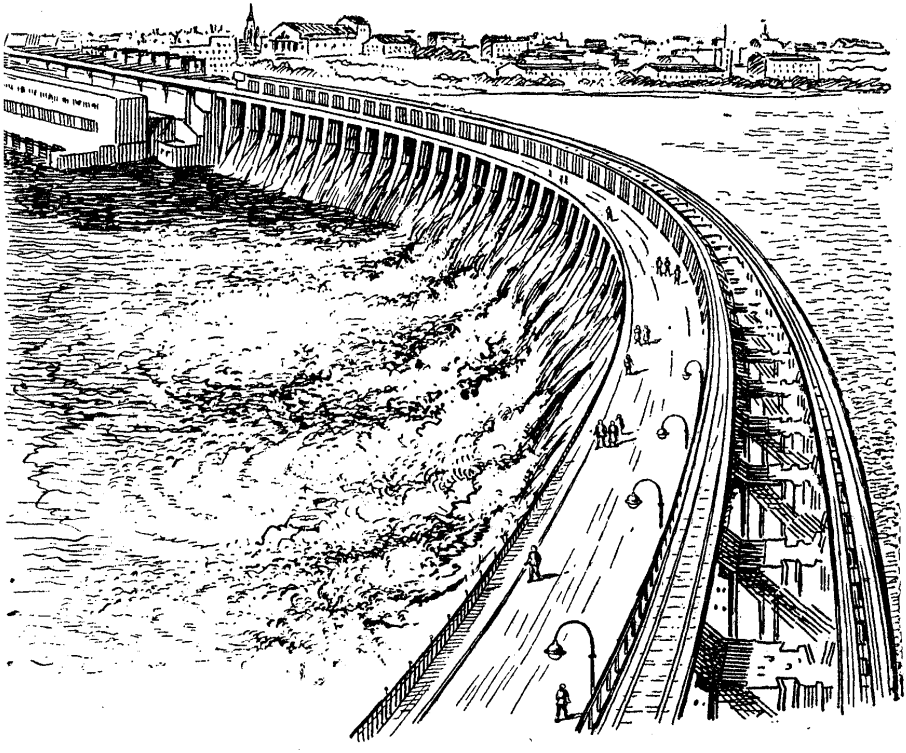


Рис. 109. Плотина Днепровской гидроэлектростанции имени В. И. Ленина.

Мощность источника воды зависит не только от высоты h, с которой вода падает (высота напора), но и от количества воды, протекающей в 1 *сек*. Если, например, в 1 *сек* проходит Q *м*^{3} воды, т. е. 1000 Q *кГ*, то эта вода, падая с высоты h, может развить мощность

$$\frac{1000 \cdot Q \cdot h}{75} \text{ л. с.}$$

В природе сравнительно редко встречаются случаи, когда вода в большом количестве падает непосредственно со значительной высоты. Чаще всего приходится пользоваться такими реками, русла которых имеют небольшой уклон. В этих случаях для создания напора, необходимого для работы гидравлических двигателей, приходится уровень воды поднимать искусственно при помощи плотин. Если установить плотину поперёк реки, то уровень воды в реке перед плотиной поднимется.

На рисунке 109 изображена плотина Днепровской гидроэлектростанции имени В. И. Ленина. Максимальная высота напора воды около 51 *м*, общая длина плотины 760 *м*.

За счёт энергии поднятой воды гидравлические двигатели могут совершить механическую работу. При этом они используют как потенциальную, так и кинетическую энергию воды.

Одно из простейших и древнейших двигателей — водяное колесо. На рисунке 110 изображён разрез наливного колеса, которое использует главным образом потенциальную энергию воды и лишь частично кинетическую энергию. Коэффициент полезного действия такого

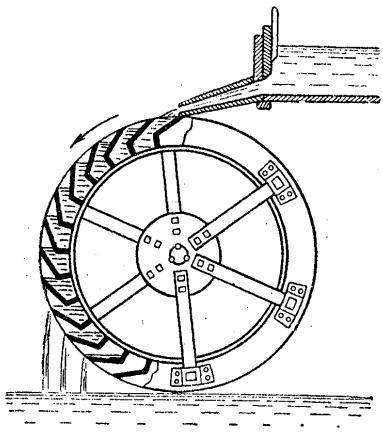


Рис. 110. Схема устройства наливного водяного колеса.

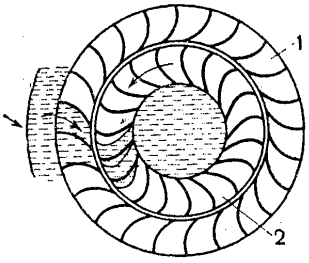


Рис. 111. Схема течения воды через реактивную турбину.

колеса порядка 40%, а мощность незначительная. В настоящее время водяные колёса строятся редко.

Наиболее совершенные гидравлические двигатели — в о д я н ы е т у р б и н ы. В таких турбинах вода отдаёт энергию колесу путём изменения величины и направления своей скорости в лопастях турбины.

Строящиеся и используемые в настоящее время турбины подразделяются на р е а к т и в н ы е и а к т и в н ы е.

На рисунке 111 изображена схема течения воды через реактивную турбину. Рабочее колесо *2* этой турбины находится внутри направляющего колеса *1* с поворотными лопатками. Поворотом лопаток направляющего колеса регулируется расход воды.

С лопаток направляющего колеса вода с большой скоростью (v_0) устремляется на лопатки рабочего колеса и, пройдя по ним, уходит в отводную трубу со значительно меньшей скоростью (v). Масса воды m передаёт при этом рабочему колесу энергию:

$$\frac{mv_0^2}{2} - \frac{mv^2}{2} = A.$$

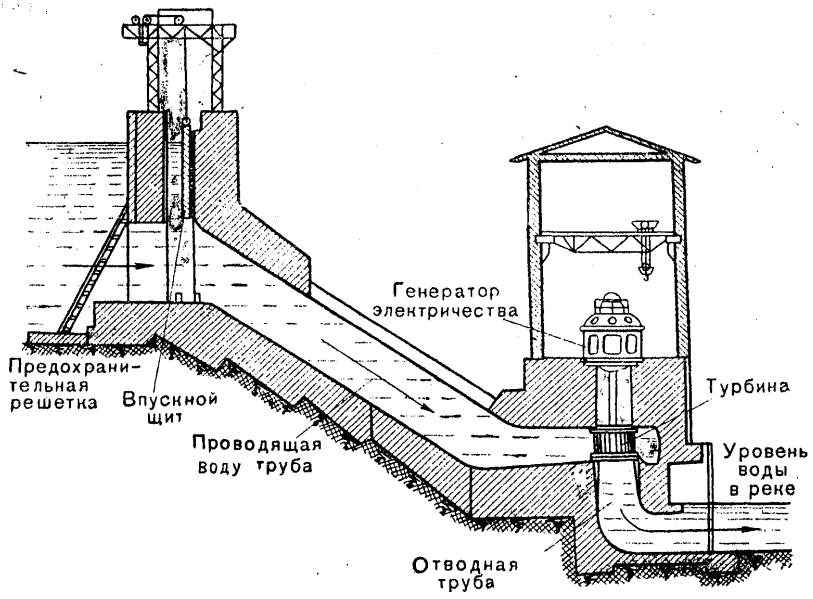


Рис. 112. Схема установки реактивной турбины на гидроэлектростанции.

На рисунке 112 показана схема установки реактивной турбины на гидроэлектростанции, а на рисунке 113 изображено отдельно рабочее колесо большой реактивной турбины. Мощность турбин, установленных на Волжской ГЭС имени В. И. Ленина, порядка 115 тыс. *квт*. Диаметр рабочего колеса такой турбины 9,3 *м*, а её общий вес около 1500 *Т*.

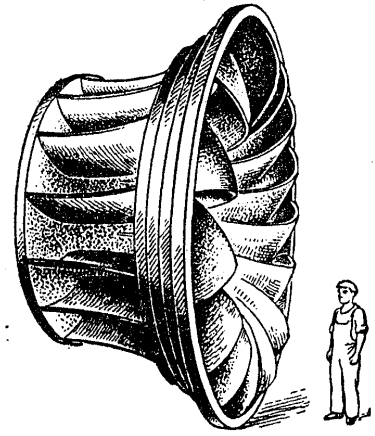


Рис. 113. Вид рабочего колеса мощной реактивной турбины.

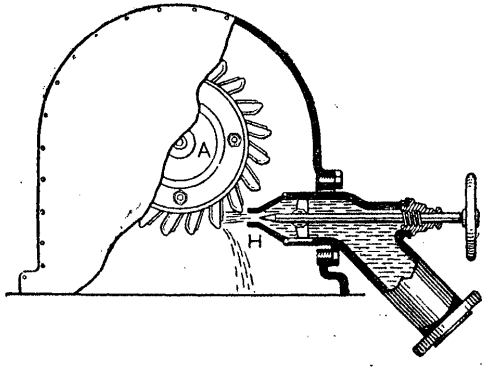


Рис. 114. Схема работы активной турбины.

Реактивные турбины применяются при самых разнообразных напорах (от 0,5 до 250 *м*). Коэффициент полезного действия их доходит до 94,5%.

На рисунке 114 изображена схема работы активной турбины. Вода из насадки *H* (сопла), внутри которой движется игла, регулирующая поступление воды, попадает на рабочее колесо *A*, снабжённое лопатками, имеющими внутри так называемый нож (это колесо изображено отдельно на рис. 115). Попав на лопатку в направлении, почти касательном к ободу колеса, струя воды разрезается ножом и отклоняется в обе стороны. При этом вода теряет скорость, отдавая колесу свою кинетическую энергию; за счёт этой кинетической энергии и происходит работа турбины.

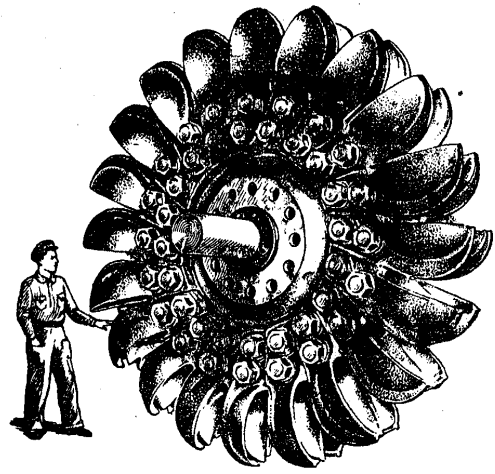


Рис. 115. Вид рабочего колеса мощной активной турбины.

Активные турбины применяются при напорах от 100 *м* и выше. Их мощность доходит до 20 000 *квт*, а число оборотов — до 200 в минуту.

59. Ветряные двигатели. Ветряными двигателями называются сооружения, служащие для использования энергии движущегося воздуха — ветра. Энергия ветра иногда называется энергией «голубого угля».

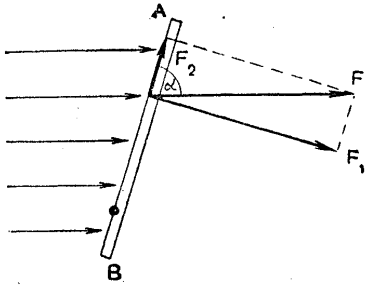


Рис. 116. Силы, действующие со стороны ветра на пластинку *AB*.

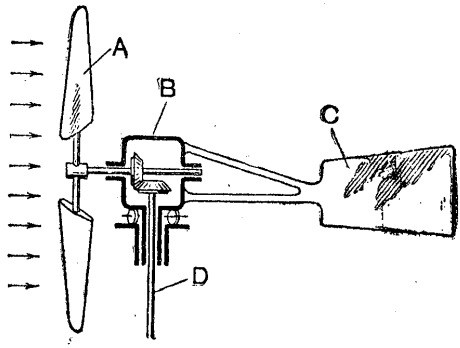


Рис. 117. Схема устройства крыльчатого ветродвигателя.

Этот вид энергии имеет важное значение для сельского хозяйства, где ветряные двигатели могут выполнять многие разнообразные работы: помол зерна, выкачивание воды, размешивание глины и т. д.

Ветер представляет собой источник дешёвой энергии, к сожалению обладающий большим непостоянством. Поэтому ещё до сих пор он исполь-

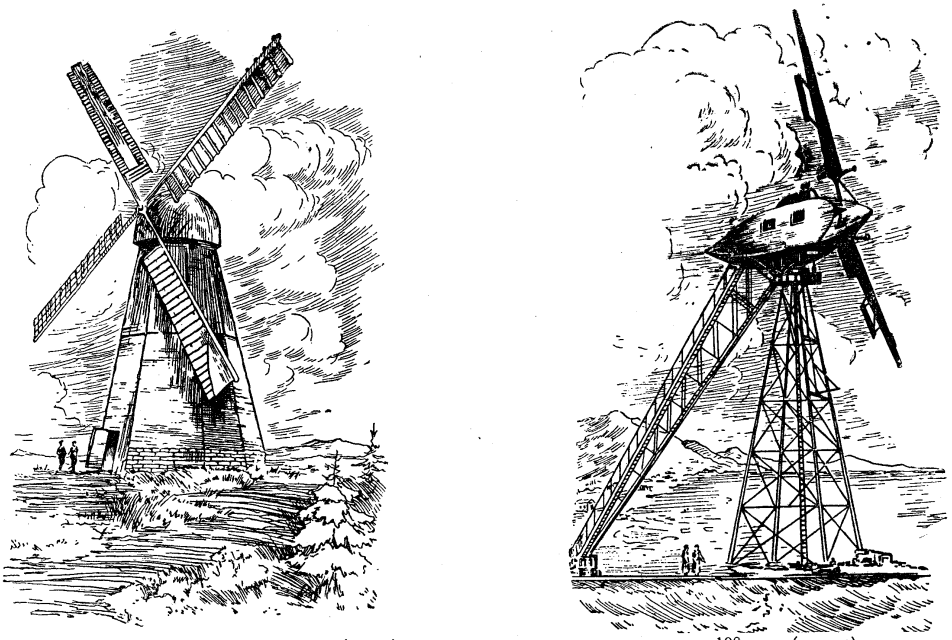


Рис. 118. Ветряная мельница (слева) и ветросиловая станция мощностью 100 *квт* (справа).

зуется относительно мало. Лишь в последние годы снова начали интересоваться энергией ветра с целью использования её для нужд промышленности и особенно сельского хозяйства.

Опытами найдено, что сила давления ветра, действующая на перпендикулярно поставленную площадку, зависит от скорости ветра, формы и величины поверхности площадки.

Пусть ветер действует на пластинку AB под некоторым углом α с силой F (рис. 116).

Построим параллелограмм сил F, F_1, F_2. Сила F_2 направлена вдоль пластинки AB и давления на пластинку не оказывает. На пластинку AB действует только сила $F_1 = F \cdot \sin \alpha$. Чем ближе угол между направлением ветра и поверхностью пластинки к 90°, тем большее давление последняя будет испытывать. Если пластинка AB насажена на ось, то под действием слагающей давления F_1 она придёт во вращение.

Схема одного из типов ветряных двигателей изображена на рисунке 117.

Главными его частями являются: а) ветровое колесо A, состоящее из нескольких крыльев; б) головка B — механизм, преобразующий вращение ветрового колеса в более быстрое вращение вертикального вала D, связанного с рабочим механизмом; в) устройство для поворота ветрового колеса навстречу ветру, например хвост C.

Современные ветряные двигатели снабжаются приспособлениями для автоматического поворачивания рабочего колеса при изменении направления ветра.

На рисунке 118 изображены старая ветряная мельница (слева) и современная ветроэлектрическая станция мощностью 100 *квт* (справа).

РАЗДЕЛ II
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕПЛОТА

ГЛАВА V
ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

60. Развитие молекулярно-кинетической теории. ***Молекулярно-кинетической теорией называется учение, объясняющее свойства тел взаимодействием и движением молекул и атомов.***

Основные положения, на которых базируется молекулярно-кинетическая теория вещества, высказывались уже в глубокой древности. Ещё Демокрит и Левкипп, знаменитые мыслители древней Греции, около 2300 лет назад учили, что все вещества построены из мельчайших частиц — атомов и что эти атомы могут быть различных видов.

Те же мысли встречаем мы через столетие у Эпикура, а несколько позже у древнеримского поэта и мыслителя Лукреция в его знаменитой поэме «О природе вещей».

Идеи античных атомистов долгое время находились в забвении. Церковь преследовала учёных, развивавших идеи об атомно-молекулярном строении вещества. Показателен в этом отношении следующий исторический факт. В 1626 г. парижский парламент издал декрет, запрещавший под угрозой смертной казни распространение идей об атомно-молекулярном строении вещества как материалистических в своей основе.

Несмотря на преследование церкви, блестящие мысли, скорее догадки, античных атомистов снова получили распространение и дальнейшее развитие в середине XVII в. В подлинную же научную теорию эти идеи превращаются только в XVIII в.

Одним из основателей молекулярно-кинетической теории вещества является великий русский учёный М. В. Ломоносов.

В двух своих работах: «Элементы математической химии» и «О нечувствительных физических частицах» — Ломоносов отчётливо излагает основы атомно-молекулярной теории строения вещества, подкрепляя их опытными фактами.

Ломоносов писал: «Металлы и некоторые другие тела растворяются в растворителях на очень мелкие части, которые нельзя

видеть отдельно от растворителя, но которые составляют с ним однородное тело. Летучие тела распыляются по воздуху и исчезают в нём. Горючие рассеиваются от действия огня в нечувствительные частички».

Указав на ряд других опытных данных, Ломоносов делает вывод: «Физические тела разделяются на мельчайшие части, в отдельности избегающие чувства зрения, так что тела состоят из нечувствительных частичек».

Движением «нечувствительных частичек» (молекул) и их взаимодействием Ломоносов объяснял особенности агрегатных состояний вещества, а также переход вещества из одного агрегатного состояния в другое.

В трудах Ломоносова представления об атомно-молекулярном строении вещества развиваются в ясное и конкретное учение, на основе которого стало возможным объяснять многие физические и химические явления.

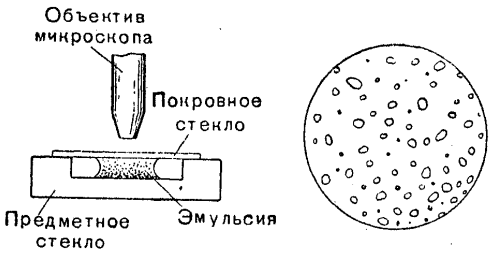


Рис. 119. Схема установки для наблюдения броуновского движения (слева); справа изображены движущиеся частички, наблюдаемые в микроскоп.

Научные основы молекулярно-кинетической теории, заложенные Ломоносовым, получили дальнейшее развитие в XIX столетии. В середине XIX в. была подробно разработана молекулярно-кинетическая теория газов, которая стала руководящей теорией при изучении свойств газов. Она предсказала большое число новых фактов и объяснила многие явления.

Мы не видим молекул. Тем не менее наши представления о молекулах и их движении подтверждаются многочисленными опытами. Рассмотрим некоторые из них.

61. Броуновское движение. К числу опытных доказательств движения молекул в теле относится явление, открытое в 1827 г. английским учёным Броуном.

Если рассматривать под микроскопом эмульсию — мелкие частички какого-либо вещества, взвешенные в жидкости и не растворяющиеся в ней (рис. 119), то можно заметить, что эти частички находятся в непрерывном движении. Направление и величина скорости каждой такой частички быстро меняются. Движение частичек не имеет какого-нибудь преимущественного направления, оно совершенно беспорядочно, хаотично[1]. Это движение и называется броуновским движением.

Для наблюдения броуновского движения необходимо примешать к жидкости любые достаточно мелкие твёрдые частицы.

[1] Хаос (греч. слово) — полный беспорядок.

Можно, например, развести в воде небольшое количество чёрной туши и рассматривать под микроскопом мельчайшие её крупинки в капле воды.

Броуновское движение, наблюдаемое в жидкостях, оказывается тем оживлённее, чем меньше вязкость жидкости. Имеет место броуновское движение и в газах, причём там оно особенно интенсивно.

Наблюдения показывают, что броуновское движение никогда не прекращается. Внутри закрытой со всех сторон кюветы его можно наблюдать всегда: в любое время дня, зимой и летом, его можно наблюдать в течение многих дней, месяцев, лет. Оно тесно связано с тепловым состоянием жидкости: с повышением температуры интенсивность броуновского движения возрастает.

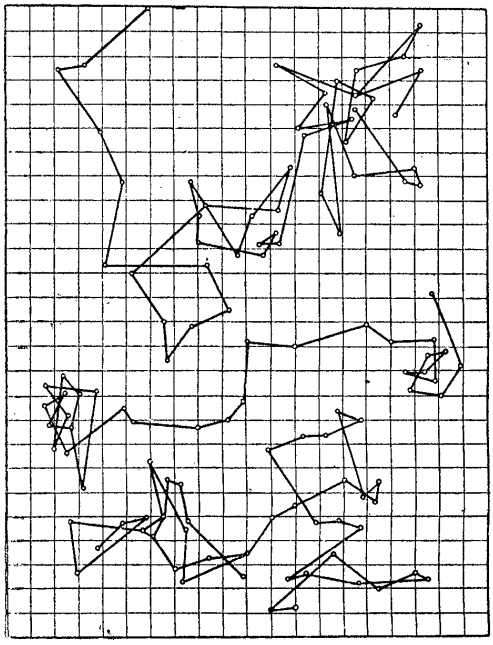


Рис. 120. Траектории движения частиц в броуновском движении. Светлыми кружочками отмечены местонахождения частиц через каждые 30 секунд.

Что же является причиной броуновского движения?

Единственная причина броуновского движения — никогда не прекращающееся движение молекул той среды (жидкости или газа), в которой находятся частицы.

Жидкость только кажется под микроскопом сплошной, на самом же деле она состоит из отдельных беспорядочно движущихся молекул, значительно более мелких, чем частицы в броуновском движении. Молекулы при своём движении ударяются о такие частицы, сдвигают их с места и таким образом косвенно обнаруживают себя. Ясно, что движущиеся молекулы жидкости толкают частицу одновременно со всех сторон; но так как движение молекул совершенно беспорядочно (хаотично), то частица, очевидно, может получить то с одной стороны большее число ударов, то с другой, что и заставляет её двигаться по зигзагообразной траектории (рис. 120).

Тело обычных, т. е. достаточно больших, размеров, помещённое в жидкость (или газ), также испытывает толчки со стороны движущихся молекул жидкости (или газа). Но толчков так много, что сравнительно небольшая разница в их числе, которая случайно может образоваться с одной стороны тела, не сможет привести его в движение; такое тело в жидкости остаётся в покое. Чем

меньше тело, тем меньше толчков оно испытывает. Для микроскопических частиц, наблюдаемых в броуновском движении, общее число испытываемых ими толчков уже не так велико, поэтому преобладание толчков то одного, то другого направления случается постоянно, и частица движется из стороны в сторону.

Нужно хорошо уяснить себе, что наблюдаемая в броуновском движении частица содержит в себе миллионы молекул; поэтому её беспорядочное движение не есть собственно молекулярное движение. Мы не можем заметить толчки отдельной молекулы, а наблюдаем только случайное преобладание толчков молекул в одном каком-нибудь направлении.

Наиболее подробно броуновское движение было изучено на опыте французским учёным Перреном. Представление о хаотическом характере броуновского движения даёт один из рисунков, сделанных Перреном (рис. 120). На этом рисунке отмечено положение одной и той же частицы в поле зрения микроскопа через каждые 30 секунд; эти положения соединены прямыми линиями, хотя в действительности и за эти промежутки времени частица совершала самые беспорядочные движения.

Изучение броуновского движения имело большое значение в развитии науки о строении вещества, так как дало возможность учёным установить важные закономерности молекулярного движения.

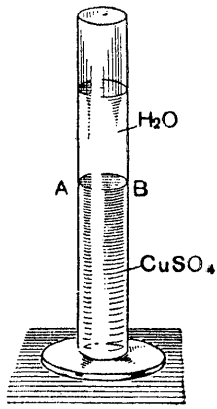


Рис. 121. Установка для наблюдения диффузии жидкостей.

62. **Диффузия.** Если в сосуд, до половины наполненный раствором медного купороса, осторожно налить чистой воды поверх раствора, то сначала получается резко обозначенная поверхность раздела AB между бесцветной водой и синим раствором (рис. 121). Но через некоторое время можно заметить, как вода постепенно начинает синеть, поверхность раздела становится нерезкой, а спустя длительное время исчезает.

В данном опыте мы сталкиваемся с новым физическим явлением, которое носит название диффузии.

Диффузия—это процесс взаимного проникновения друг в друга разных веществ, приведённых в соприкосновение.

Легко обнаружить диффузию в газах. Наполним уравновешенный на весах стакан тяжёлыми парами эфира. Чашка весов с парами эфира перетягивает (рис. 122). Через некоторое время замечаем, что весы приходят в равновесие, а в комнате чувствуется запах эфира. Значит, несмотря на то что пары эфира тяжелее воздуха, они из стакана проникли в комнату.

Диффузия обнаруживается не только в жидкостях и газах, но и в твёрдых телах. В одном из опытов гладко отшлифованные пластинки свинца и золота клали одну на другую и ставили на них груз. При обычной комнатной температуре (около 20° С) за 5 лет

золото и свинец срослись, взаимно проникнув друг в друга на расстояние в 1 *см*. Получился слой из однородного сплава золота со свинцом, хотя, конечно, ни о каком плавлении этих металлов при 20° С не могло быть и речи.

Результаты описанных опытов легко объясняются молекулярно-кинетической теорией.

Действительно, если соприкасающиеся тела состоят из отдельных беспорядочно движущихся молекул, то естественно, что эти молекулы могут переходить через границу соприкосновения тел, а это и представляет собой явление диффузии.

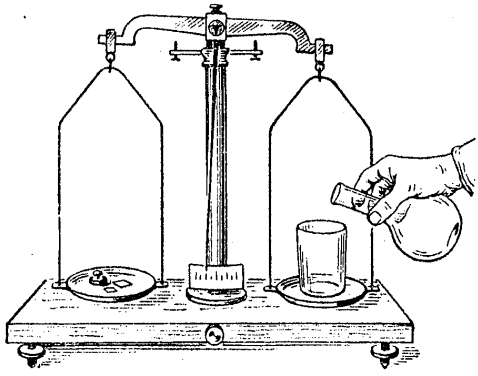


Рис. 122. Опыт по наблюдению диффузии паров эфира в воздухе.

Из опытов с диффузией можно сделать также вывод о том, что в телах между молекулами имеется свободное пространство, в которое могут проникать другие молекулы.

Если явление диффузии имеет место при соприкосновении разных веществ, то в одном и том же газе или жидкости должно происходить то же самое. *В результате диффузии плотность газа во всем объёме выравнивается.*

Процесс диффузии ускоряется с повышением температуры, что может быть объяснено тем, что с повышением температуры увеличивается скорость беспорядочного движения молекул.

Явление диффузии играет большую роль в природе: оно способствует поддержанию однородности состава атмосферного воздуха вблизи поверхности Земли. Диффузия растворов различных солей в почве способствует нормальному питанию растений.

63. О земной атмосфере. Как и все тела, частицы окружающего нас воздуха притягиваются к Земле. Но почему же тогда они все не упадут на поверхность Земли? Чем объяснить наличие у Земли атмосферы?

Только непрерывным движением молекул можно объяснить тот факт, что, несмотря на свой вес, газы, составляющие атмосферу, не находятся на поверхности Земли, а распределяются со всё уменьшающейся плотностью в весьма толстом слое, достигающем тысячи километров. Такое распределение газа в атмосфере происходит под влиянием, с одной стороны, силы тяготения, притягивающей молекулы к Земле, с другой стороны, движения молекул воздуха, разбрасывающего молекулы по всем направлениям.

Следы земной атмосферы обнаружены с помощью искусственных спутников Земли на расстоянии 1500 *км* и более от её поверхности.

Свыше 79% массы атмосферы находится в тропосфере — до высоты 10—16 *км*. Над ней до высоты 80—90 *км* простирается стратосфера, составляющая 20% всей массы атмосферы. Ещё выше расположена ионосфера, содержащая менее 0,5% массы атмосферы.

64. Опыты, объясняемые молекулярно-кинетической теорией. Поместим под колокол воздушного насоса закрытую волейбольную камеру, содержащую небольшое количество воздуха. Мы

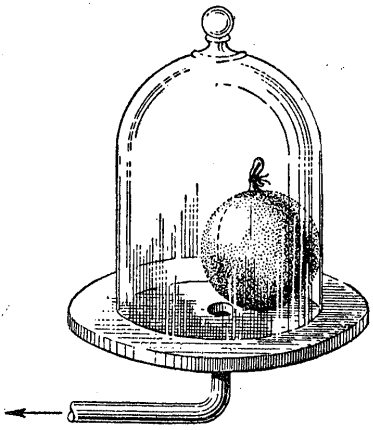


Рис. 123а. При выкачивании воздуха из-под колокола резиновая камера постепенно раздувается, принимая форму шара.

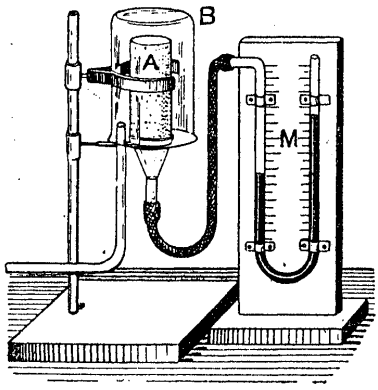


Рис. 123б. Установка для наблюдения диффузии природного газа или водорода в воздухе.

заметим, что по мере выкачивания воздуха из-под колокола камера постепенно раздувается, принимая форму шара (рис. 123а). Как объяснить результат этого опыта?

Движущиеся молекулы воздуха непрерывно бомбардируют стенки камеры снаружи и изнутри. При откачивании воздуха из-под колокола быстро уменьшается число молекул, бомбардирующих камеру снаружи. Но внутри закрытой камеры число молекул не изменяется; их воздействие на стенку камеры всё более и более превышает воздействие наружных молекул; в результате камера раздувается.

Опыт показывает, что молекулы различаются по своим размерам и массе.

При одной и той же температуре и при одном и том же давлении молекулы с меньшей массой движутся быстрее, чем молекулы более массивные. Это заключение можно подтвердить на следующем опыте.

К пористому сосуду *A* примазана воронка, соединённая с манометром *M*. Если этот сосуд поместить под стеклянный стакан *B* и наполнить последний природным газом (или водородом), то давле-

ние внутри сосуда повышается (рис. 123 б). Это происходит вследствие того, что природный газ, молекулы которого имеют меньшую массу и обладают большей подвижностью, чем молекулы кислорода и азота, проникает через поры сосуда быстрее, чем из них выходит воздух. Если через некоторое время снять с пористого сосуда стеклянный стакан B с природным газом, то давление внутри сосуда падает и становится меньше атмосферного давления. Теперь природный газ быстрее выходит из пористого сосуда, чем воздух снаружи входит в него.

65. Число молекул в единице объёма вещества. Размеры молекул. В мире молекул, или, как принято говорить, в микромире, мы встречаемся с очень большими количествами очень малых частиц. Различными способами (они изучаются в высшей школе) найдено, что *в 1 $см^3$ любого газа при нормальных условиях (0° С и 760 мм рт. ст.) содержится около $2{,}7 \cdot 10^{19}$ молекул.*

Чтобы представить себе, насколько велико это число, рассмотрим следующие примеры.

Представим себе ампулу ёмкостью в 1 $см^3$. Допустим, что ампула пуста. Каким-либо образом пробьём в ампуле тончайшее отверстие, такое, чтобы через него в 1 *сек* могло проникать внутрь ампулы по 100 млн. молекул воздуха. Спрашивается, сколько времени понадобится, чтобы таким путём наполнить ампулу до нормальной плотности?

Подсчёт показывает, что для этого нужно будет около 9000 лет.

Другой пример. Если взять число кирпичей, равное числу молекул в 1 $см^3$ газа при нормальных условиях, то, будучи плотно уложены, эти кирпичи покрыли бы поверхность всей суши земного шара слоем высотой в 120 *м*, т. е. высотой, превосходящей почти в 4 раза высоту 10-этажного дома.

Огромное число молекул, содержащихся в 1 $см^3$ газа, указывает на очень малые размеры самих молекул. Даже в самый сильный микроскоп мы не можем увидеть молекулу простого вещества [1]. Однако существуют разнообразные способы, позволяющие определить порядок величины объёма молекулы. Один из таких способов состоит в следующем. Если вылить на поверхность воды в каком-нибудь сосуде крошечную капельку масла, она растечётся, образовав на воде тончайшую плёнку. Как бы ни была тонка эта плёнка, она состоит не менее чем из одного слоя молекул. Определить толщину этой плёнки нетрудно. Допустим, что мы вылили капельку масла объёмом 0,001 $см^3$ на поверхность воды; при этом оказалось, что, растекаясь, капелька масла образовала тонкую плёнку площадью 0,5 $м^2$, т. е. 5000 $см^2$. Зная объём плёнки (равный объёму капельки) и величину её поверхности, найдём толщину плёнки:

$$d = \frac{0{,}001\ см^3}{5000\ см^2} = 2 \cdot 10^{-7}\ см.$$

[1] Современные электронные микроскопы позволяют различить очертания некоторых сложных молекул, состоящих из сотен атомов.

Поперечник одной молекулы на самом деле ещё меньше. Точные измерения и расчёты показывают, что диаметры молекул (если принимать их за шары) — порядка двух стомиллионных долей сантиметра ($2 \cdot 10^{-8}$ *см*).

Чтобы иметь представление о порядке величины массы молекулы, рассчитаем массу молекулы водорода.

Масса всех молекул водорода в 1 $см^3$ при 0° С и давлении в одну атмосферу равна 0,00009 *г*; разделив эту массу на общее число молекул, содержащихся в 1 $см^3$, найдём массу одной молекулы:

$$m_{H_2} = \frac{0{,}00009\ г}{2{,}7 \cdot 10^{19}} \approx 3{,}3 \cdot 10^{-24}\ г.$$

66. Скорость движения молекул. Скорость движения газовых молекул можно измерить на опыте.

Один из таких опытов заключается в следующем. В сильно откачанном сосуде находится платиновая посеребрённая проволока *PP* (рис. 124, *а*), которая окружена двумя цилиндрами *A* и *B* так, что является их общей осью, вокруг которой цилиндры могут вращаться.

Во внутреннем цилиндре *A* параллельно проволоке прорезана узкая щель *S*. Платиновую проволоку накаливают электрическим током до температуры, при которой серебро начинает плавиться и испаряться. При этом некоторые молекулы серебра пролетают через щель и отлагаются на внешнем цилиндре в виде серебряной полоски *L* (рис. 124, *б*), которая представляет собой чёткое изображение щели.

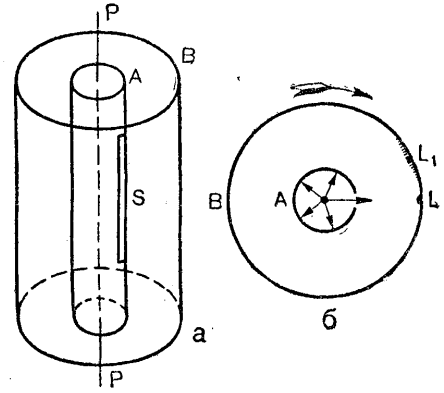


Рис. 124. Схема установки для определения скорости движения молекул.

Затем оба цилиндра приводятся во вращение в направлении, указанном стрелкой. После остановки цилиндров оказывается, что серебряная полоска *L*, отложившаяся на внешнем цилиндре *B* во время его движения, сместилась в сторону, противоположную вращению прибора, в положение L_1.

Это смещение объясняется тем, что пока молекулы серебра пробегали расстояние от щели *S* до внешнего цилиндра, произошло смещение цилиндра на расстояние LL_1 (рис. 124, *б*).

Чем больше скорость вращения цилиндров, тем большее получается смещение. Зная расстояние, на которое смещается полоска серебра, и скорость вращения цилиндров, можно определить скорость движения молекул.

Серебряная полоска L_1, получающаяся во время вращения цилиндров, по краям размыта. Наиболее плотной оказывается средняя часть её, по обе же стороны плотность её несколько уменьшается.

Этот факт указывает на то, что при одной и той же температуре различные молекулы одного и того же вещества обладают разными скоростями, хотя большинство молекул, отложившихся в средней части полоски, обладают скоростями, близкими по величине друг к другу.

Из опыта найдено, что при температуре 1200° С (накал нити) скорость большинства молекул серебра находится в пределах от 500 до 625 $\frac{м}{сек}$.

Невозможно предсказать, какую скорость и какое направление будет иметь та или иная молекула. Но замечательно то, что в огромной массе хаотически движущихся молекул газа существует определённое распределение молекул по скоростям. Оказывается, что наибольшее число молекул, заключённых в данном объёме газа, движется со скоростями, близкими к некоторой скорости, которую называют наивероятнейшей скоростью при данной температуре газа.

Ниже в таблице приведено распределение молекул азота по скоростям при комнатной температуре.

Пределы скоростей, $\frac{м}{сек}$	Процент общего числа молекул, имеющих скорости, заключённые в указанных пределах
Меньше 100	1
От 100 до 300	25
» 300 » 500	42
» 500 » 700	24
» 700 » 900	7
Свыше 900	1

Из таблицы видно, что наибольшее число молекул имеет скорости в пределах от 300 до 500 $\frac{м}{сек}$; между 100 и 700 $\frac{м}{сек}$ заключены скорости 91% числа всех молекул, и лишь 9% имеют скорости, бо́льшие 700 $\frac{м}{сек}$ и меньшие 100 $\frac{м}{сек}$.

Таким образом, в очень большом числе случайных явлений существует определённая закономерность.

Средние скорости молекул некоторых газов при 0°С и 760 *мм рт. ст.*

Водород . . . . . 1692 $\frac{м}{сек}$ Азот . . . . . 454 $\frac{м}{сек}$

Кислород . . . . . 425 $\frac{м}{сек}$ Водяной пар . . . . . 566 $\frac{м}{сек}$

При повышении температуры скорости молекул возрастают. Но и при 0° скорости эти громадны, они сравнимы лишь со скоростями артиллерийских снарядов.

67. Число столкновений и средняя длина свободного пробега молекул. Средняя скорость движения молекул, как мы видели, при обычных условиях чрезвычайно велика. Между тем наблюдения за диффузией показывают, что это явление, даже в газах, частицы которых наиболее подвижны, протекает сравнительно медленно.

Известно, например, что если пролить где-нибудь в комнате духи, то запах от них, который вызывается испарением и диффузией духов в воздух, не очень быстро распространяется по всей комнате.

Не опровергает ли медленный процесс диффузии то, что было сказано о больших скоростях молекул? Нет, не опровергает. Дело в том, что каждая молекула газа при движении испытывает на своём пути огромное число столкновений с другими молекулами. Подсчитано, что в среднем каждая молекула азота, например, при 0° С и давлении 1 *ат* сталкивается в течение секунды

с другими молекулами около 7,5 миллиарда раз. Поэтому её «свободный пробег», т. е. средняя длина пути, проходимого от одного столкновения до другого, крайне мал.

Мы найдём его, если разделим среднюю скорость молекулы на среднее число её столкновений. Так, например, средняя длина λ свободного пробега молекулы азота будет равна:

$$\lambda = \frac{454 \cdot 100 \frac{см}{сек}}{7{,}5 \cdot 10^9 \frac{1}{сек}} \approx 0{,}000006 \ см.$$

Таким образом, молекула газа, находящегося в обычных условиях, больше «топчется на месте», чем движется вперёд.

68. Силы взаимодействия между молекулами. Всякое тело состоит из отдельных атомов или молекул. Но почему всё же трудно отделить, например, одну часть твёрдого тела от другой? Дело в том, что между отдельными молекулами действуют силы взаимного притяжения. Эти силы притяжения (сцепления) оказывают сопротивление всякой попытке отделить одну часть тела от другой. Силы притяжения между молекулами действуют

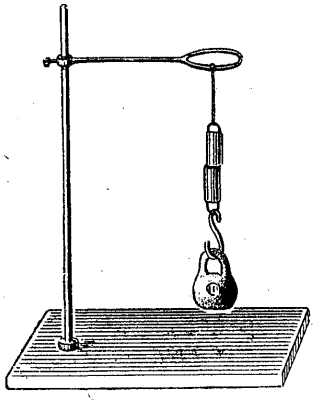


Рис. 125. Опыт, показывающий наличие сил сцепления между молекулами твёрдого тела.

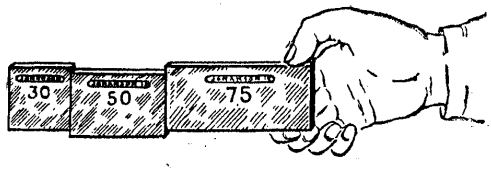


Рис. 126. При соприкосновении плиток Иогансона проявляется действие сил молекулярного притяжения.

только на очень малых расстояниях. Осколки стекла нельзя срастить, прикладывая их друг к другу, так как из-за неровностей не удаётся их сблизить на то расстояние, на котором начинают проявляться силы молекулярного притяжения. Но если размягчить стекло нагреванием, то размягчённые части можно тесно сблизить, и стекло в этом случае спаивается.

Два куска свинца, сильно сдавленные друг с другом, соединяются в один кусок столь прочно, что можно на такой кусок подвесить груз в несколько килограммов (рис. 125). Из свинцовых опилок можно легко спрессовать целый кусок свинца.

На производстве для измерений употребляются гладкие, отполированные стальные пластинки (так называемые плитки Иогансона). При соприкосновении плиток Иогансона заметно проявляется действие сил молекулярного притяжения (рис. 126).

Соединение двух кусков металла при сварке или пайке их объясняется действием сил молекулярного притяжения.

В твёрдых телах молекулы сближены между собой, поэтому силы притяжения между ними очень велики. Этим объясняется, что твёрдое тело сохраняет свою форму и объём. А чтобы изменить их, надо приложить значительную силу.

Но и в твёрдых телах частицы не неподвижны: они беспорядочно колеблются около некоторых средних положений.

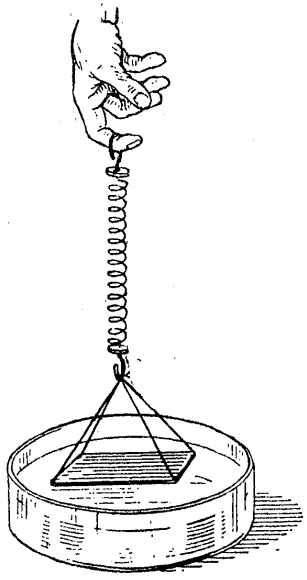


Рис. 127. При отрыве стеклянной пластинки от воды пружина растягивается; таким путем обнаруживается существование сил сцепления между стеклом и водой.

В существовании сил сцепления между молекулами жидкости легко убедиться на следующем опыте.

К пружине (рис. 127) подвешивают на нитке стеклянную пластинку так, чтобы её нижняя поверхность была расположена горизонтально. Если эту пластинку поднести к сосуду с водой так, чтобы вода смачивала пластинку, то последняя прилипнет к воде. При отрывании пластинки от воды пружина заметно растягивается, что доказывает существование сил сцепления. По величине растяжения пружины можно определить силу, нужную для отрывания пластинки. Оторвав пластинку, можно увидеть, что её нижняя поверхность оказывается мокрой; значит, при отрывании пластинки мы преодолеваем силы сцепления между частицами воды.

Наличием сил взаимодействия между частицами жидкости объясняется тот факт, что две капли жидкости при соприкосновении сливаются в одну каплю.

В жидкостях силы притяжения между молекулами вследствие большой близости их весьма значительны, но связь между молекулами позволяет ещё отдельным молекулам «скользить» друг относительно друга. Поэтому жидкость легко меняет свою форму при переливании из одного сосуда в другой. Это свойство жидкостей называют текучестью.

Твёрдое тело трудно растянуть, но так же трудно его и сжать. Трудно сжать и жидкость.

Следовательно, ***молекулярные силы проявляются не только в притяжении, но и в отталкивании, чем объясняется сопротивление тел как растяжению, так и сжатию.***

Не первый взгляд трудно понять, каким образом силы молекулярного взаимодействия могут быть и силами притяжения, и силами отталкивания. Вспомним, однако, что взаимодействие электри-

ческих зарядов также бывает и притяжением, и отталкиванием, а в атомах есть и положительно, и отрицательно заряженные частицы. Одноимённо заряженные частицы отталкиваются, а разноимённо заряженные притягиваются.

Связь между частицами в твёрдых телах похожа на связь между шариками при помощи пружинок (рис. 128). Пружинки сопротивляются как растяжению, так и сжатию. Конечно, в действительности никаких пружинок нет, но эта простая модель связи даёт возможность приблизительно верно объяснить результаты опытов.

Рис. 128. Модель, иллюстрирующая характер связи между частицами в твёрдых телах.

Мы рассмотрели проявление сил молекулярного притяжения и отталкивания в твёрдых и жидких телах. Обратимся теперь к газам.

Плотность газов значительно меньше плотности твёрдых и жидких тел. Так, плотность водяного пара при 100° и давлении 1 *ат* меньше плотности воды при тех же условиях в 1670 раз. Поэтому в газах частицы находятся на сравнительно более далёких друг от друга расстояниях, чем в телах твёрдых и жидких.

Следовательно, силы молекулярного притяжения и отталкивания в газах чрезвычайно малы. Это существенным образом сказывается на движении молекул газа.

Если отдельная молекула газа в данный момент движется в каком-либо направлении, то она будет продолжать это движение в том же направлении с постоянной скоростью до тех пор, пока не ударится о стенку сосуда или не столкнётся с другой молекулой.

Поступательным движением молекул газа объясняется свойство газа занимать всё предоставленное ему пространство. Газ не может занимать, например, только нижнюю половину сосуда, а распространяется по всему сосуду.

Какова природа сил молекулярного взаимодействия?

Мы знаем, что молекулы состоят из атомов, в состав которых входят положительно и отрицательно заряженные частички — протоны и электроны.

Взаимодействием и движением этих заряженных частичек и обусловливаются молекулярные силы.

69. Тепловое движение. Температура. Знакомясь с броуновским движением (§ 61), мы отмечали, что скорость движения частичек в этом движении связана с температурой. При повышении температуры скорость движения частичек увеличивается, при понижении температуры уменьшается. Но броуновское движение есть результат хаотического движения молекул жидкости или газа.

Следовательно, *температура тела зависит от скорости движения молекул.*

Тёплая на ощупь вода состоит из таких же молекул, как и холодная. Разница между ними заключается в скорости движения молекул. Скорость движения молекул определяет собой тепловое состояние тела, поэтому *хаотическое движение молекул в газах, жидкостях и твёрдых телах называют тепловым движением.*

В тепловом движении участвуют все молекулы тела, поэтому с изменением теплового движения изменяется во всех отношениях и само тело. Действительно, в зависимости от изменения температуры меняются физические свойства вещества: объём, твёрдость, упругость, электрические, магнитные и оптические свойства. Меняется химическое сродство; соединения, которые сами собой возникают при одних температурах, распадаются при других и т. д.

Из молекулярно-кинетической теории следует, что температура тела находится в тесной связи со средней кинетической энергией молекул. ***Чем больше средняя кинетическая энергия молекул тела, тем выше его температура.*** Уменьшение средней кинетической энергии молекул соответствует понижению температуры тела.

Если средняя кинетическая энергия молекул одного газа равна средней кинетической энергии молекул другого газа, то температуры этих газов одинаковы. С другой стороны, если мы имеем смесь, состоящую из нескольких газов, например воздух, то при установившейся температуре средняя кинетическая энергия молекул всех газов, входящих в смесь, одинакова.

Можно считать также, что при одной и той же температуре средняя кинетическая энергия молекул вещества одна и та же, в каком бы состоянии вещество ни находилось. Так, средняя кинетическая энергия молекул льда при 0° С равна средней кинетической энергии молекул воды при 0° С; средняя кинетическая энергия молекул воды при 100° С равна средней кинетической энергии молекул пара при такой же температуре и т. д.

Итак, основные выводы молекулярно-кинетической теории сводятся к следующему:

Все тела природы состоят из колоссального числа атомов и молекул, находящихся в состоянии беспрестанного хаотического движения.

Между атомами и молекулами действуют силы притяжения и отталкивания.

Средняя величина кинетической энергии хаотически движущихся атомов или молекул определяет температуру тела. Повышение температуры означает увеличение средней скорости хаотического движения частиц, понижение температуры, наоборот, — уменьшение средней скорости этого движения.

ГЛАВА VI

ТЕПЛОТА И РАБОТА

70. Энергия движения и взаимодействия молекул. Внутренняя энергия тел. Мы теперь знаем, что молекулы, из которых состоят тела, находятся в движении. Молекулы газа движутся поступательно с разными скоростями и в разных направлениях. Для газа характерна *хаотичность движения молекул*. В жидкостях молекулы могут колебаться, вращаться и поступательно перемещаться относительно друг друга. В твёрдых телах молекулы и атомы колеблются около некоторых средних положений.

Как и всякие движущиеся тела, молекулы обладают кинетической энергией.

Мы знаем также, что молекулы в теле связаны между собой силами сцепления, в газах слабо, в жидкостях и твёрдых телах очень сильно. Поэтому молекулы обладают также потенциальной энергией, зависящей от их взаимного расположения.

Кинетическая энергия движения частиц, из которых состоит тело, вместе с потенциальной энергией взаимодействия этих частиц составляют внутреннюю энергию тела.

Имея всегда какой-то запас внутренней энергии, тело одновременно может обладать механической энергией. Например, снаряд, движущийся на некоторой высоте, кроме внутренней энергии, обладает ещё механической энергией — потенциальной и кинетической.

71. Изменение внутренней энергии тела. Внутренняя энергия тела не является какой-то постоянной величиной: у одного и того же тела она может изменяться. При повышении температуры, например, внутренняя энергия тела увеличивается, так как увеличивается средняя кинетическая энергия движения молекул этого тела. С понижением же температуры, наоборот, внутренняя энергия тела уменьшается.

Внутренняя энергия меняется также при переходе тела из одного агрегатного состояния в другое, при деформации тела, при раздроблении тела на более мелкие части, так как во всех этих случаях меняется взаимное расположение частиц, а значит, и их потенциальная энергия.

Из всего сказанного следует, что *внутренняя энергия тела зависит от состояния этого тела. С изменением состояния тела меняется и его внутренняя энергия.*

Рассмотрим теперь, в результате каких процессов происходит изменение внутренней энергии тела.

Если движущееся тело производит работу против сил трения, то его механическая энергия уменьшается; одновременно меняется и состояние тела. При трении тела нагреваются, дробятся на части и даже могут переходить из одного агрегатного состояния в другое (например, при трении плавятся кусочки льда). Следовательно, *в процессе совершения работы внутренняя энергия тела изменяется.*

Внутреннюю энергию тела можно изменять и иным путём. Вода в чайнике, поставленном на плиту, закипает, её внутренняя энергия изменяется. Воздух и различные предметы в комнате нагреваются от печки; следовательно, их внутренняя энергия увеличивается, так как увеличивается кинетическая энергия молекул.

Но при этом работа не совершается. Значит, изменение внутренней энергии может происходить не только в результате совершения работы, но и при различных тепловых процессах.

Процесс изменения внутренней энергии тела без совершения работы называется теплопередачей. Теплопередача осуществляется и при непосредственном контакте тел (чайник на плите), и если тела разделены расстоянием (нагревание предметов от печки или от солнца).

Итак, внутреннюю энергию тела можно изменять двумя путями: путём совершения работы и путём теплопередачи.

Когда тело увеличивает запас своей внутренней энергии, то это значит, что оно получает какое-то количество энергии извне; наоборот, уменьшение запаса внутренней энергии означает, что тело отдаёт часть своей энергии.

Мерой энергии, получаемой или отдаваемой телом в процессе теплопередачи, служит особая величина, называемая количеством теплоты.

72. **Единица количества теплоты.** В те времена, когда впервые стали измерять количество теплоты (вторая половина XVIII в.), понятиями работы и энергии в науке ещё не пользовались (они были введены в XIX в.).

Для измерения количества теплоты была введена особая единица. ***За единицу количества теплоты принято то количество теплоты, которое необходимо для нагревания 1 г воды на 1° С. Эта единица называется калорией***[1] (сокращённое обозначение: *кал*). Употребляют также и единицу, в 1000 раз большую, — к и л о к а л о р и ю (*ккал*).

---

[1] К а л о р и я — от латинского слова к а л о р — жар.

Рихман Георг (1711—1753)— замечательный русский учёный. Родился в 1711 г., в один год с Ломоносовым. Учился в Петербургской Академии наук. В 1741 г. был назначен профессором академии. Его работы касались главным образом исследования теплоты и электричества. В области теплоты он заложил основы калориметрии. Совместно с Ломоносовым впервые в России начал изучение электрических явлений. Рихман впервые применил электроскоп для исследования электрических зарядов на телах.

Тщательные измерения показывают, что для нагревания 1 *г* воды на 1° С требуется несколько большее или меньшее количество теплоты в зависимости от исходной температуры. Так, для нагревания 1 *г* воды от 1 до 2° требуется приблизительно на 1% больше количества теплоты, чем для нагревания от 31 до 32°. При точных измерениях *принято считать за* 1 *калорию количество теплоты, необходимое для нагревания* 1 *г чистой воды от* 19,5 *до* 20,5° С.

В системе СИ за единицу количества теплоты принят джоуль (*дж*).

Упражнение 17.

1. В первой половине XVIII в. ещё не существовало различия между измерением температуры и измерением количества теплоты. Большое значение в разграничении и уточнении этих понятий имели работы петербургского академика Рихмана.

Решите задачу, предложенную Рихманом:

Смешали m_1 граммов воды при температуре t_1 с m_2 граммами воды при температуре t_2. Определить температуру смеси.

2. Какова будет температура смеси, если смешать 600 *г* воды при 80° С с 200 *г* воды при 20° С?

3. Литр воды при 90° С влили в воду при 10° С, причём температура воды стала 60° С. Сколько было холодной воды?

4. Определить, сколько надо налить в сосуд горячей воды, нагретой до 60° С, если в сосуде уже находится 20 *л* холодной воды при температуре 15° С; температура смеси должна быть 40° С.

5. Прибор для измерения количества падающей на Землю солнечной энергии состоит из невысокого цилиндра, площадь основания которого 3 $дм^2$. Цилиндр содержит 1200 *г* воды, температура которой повышается на 0,5° С в 1 минуту, когда на покрытое сажей основание цилиндра падают перпендикулярно солнечные лучи. Определить, сколько калорий получает в 1 минуту каждый квадратный сантиметр поверхности Земли, перпендикулярной к направлению солнечных лучей.

73. Понятие о теплоёмкости тела. Удельная теплоёмкость вещества. Нагревая тела с одинаковой массой, но состоящие из различных веществ (железа, дерева, кирпича и т. д.), можно об-

наружить, что для повышения их температуры на данное число градусов требуется различное количество теплоты.

Количество теплоты, необходимое для нагревания тела на 1° С, называется теплоёмкостью этого тела.

Опыт показывает, что для нагревания тела не на 1° С, а на $t°$ требуется в t раз большее количество теплоты. При остывании на $t°$ тело отдаёт такое же количество теплоты, какое поглощает при нагревании на $t°$.

Чем больше масса тела, тем больше его теплоёмкость, т. е. тем большее количество теплоты требуется для нагревания его на 1° С.

Теплоёмкость однородного тела пропорциональна его массе и зависит от вещества, из которого оно состоит. Сравнивать между собой можно теплоёмкости различных веществ, имеющих одинаковую массу, равную, например, единице массы.

Количество теплоты, необходимое для нагревания 1 г вещества на 1° С, называется удельной теплоёмкостью вещества.

Пусть Q — количество теплоты, которое надо передать телу, масса которого m, чтобы повысить температуру его от $t_1°$ до $t_2°$. Чтобы определить удельную теплоёмкость вещества c, надо количество теплоты Q разделить на массу тела m и на разность температур $t_2° - t_1°$. Таким образом,

$$c = \frac{Q}{m\,(t_2° - t_1°)}.$$

Удельные теплоёмкости обычно выражают в $\frac{кал}{г \cdot град}$ или в $\frac{ккал}{кг \cdot град}$. В системе единиц СИ — в $\frac{дж}{кг \cdot град}$.

Удельная теплоёмкость воды при нагревании от 19,5° С *до* 20,5° С *равна* 1 $\frac{кал}{г \cdot град}$. В системе единиц СИ удельная теплоёмкость воды равна 4186,8 $\frac{дж}{кг \cdot град}$. При других температурах она отличается от 1 $\frac{кал}{кг \cdot град}$, но это отличие очень незначительно, и мы его в дальнейшем учитывать не будем. Вообще удельная теплоёмкость любого вещества с изменением температуры хотя и незначительно, но меняется.

Средние значения удельной теплоёмкости $\left(\frac{кал}{г \cdot град} \text{ или } \frac{ккал}{кг \cdot град}\right)$ для некоторых веществ приведены в следующей таблице:

Водород 3,41	Лёд 0,48	Железо 0,11
Гелий 1,26	Воздух 0,24	Медь 0,09
Спирт 0,58	Алюминий 0,22	Серебро 0,05
Эфир 0,56	Стекло 0,19	Ртуть 0,03
Керосин 0,51	Алмаз 0,12	Олово 0,05
		Свинец 0,03

Зная удельную теплоёмкость вещества, по формуле

$$Q = cm(t_2^\circ - t_1^\circ)$$

можно рассчитать количество теплоты, идущее на нагревание тела.

74. Измерение удельной теплоёмкости. Для измерения удельной теплоёмкости твёрдых, жидких и газообразных веществ существуют различные способы. Мы рассмотрим наиболее простой способ измерения теплоёмкости твёрдых веществ.

Испытуемое тело нагревают до определённой температуры и затем погружают его в особый прибор — калориметр, в который налито определённое количество воды (рис. 129).

Если вода в калориметре имеет температуру ниже, чем температура опущенного в неё тела, то она нагревается, а тело охлаждается до тех пор, пока их температуры не сравняются. По закону сохранения энергии количество теплоты, отданное телом, равно количеству теплоты, полученному калориметром и водой. На основании этого можно определить удельную теплоёмкость тела.

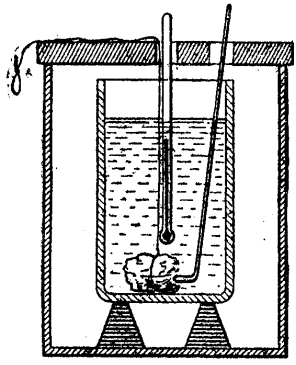


Рис. 129. Схема установки для определения удельной теплоёмкости вещества с помощью калориметра.

Пусть масса калориметра равна m_1, его удельная теплоёмкость c_1, масса воды в калориметре m_2, удельная теплоёмкость воды c, начальная температура воды и калориметра t°_1, масса испытуемого тела m, его удельная теплоёмкость c_x и начальная температура t°, общая температура калориметра и тела θ (греч. «тэта»). Тогда результат указанного опыта можно выразить уравнением:

$$c_x m(t^\circ - \theta^\circ) = c_1 m_1(\theta^\circ - t_1^\circ) + cm_2(\theta^\circ - t_1^\circ). \qquad (1)$$

Это — уравнение теплового баланса. Оно представляет собой математическое выражение закона сохранения энергии при теплообмене между телами.

Из уравнения (1) определяется искомая удельная теплоёмкость:

$$c_x = \frac{c_1 m_1(\theta^\circ - t_1^\circ) + cm_2(\theta^\circ - t_1^\circ)}{m(t^\circ - \theta^\circ)}.$$

Надо иметь в виду, что, кроме обмена энергией между внесённым телом и калориметром, такой обмен возможен между телом и окружающими калориметр предметами. При точных измерениях необходимо по возможности уменьшать потери энергии и вводить в вычисления поправки, учитывающие ту часть энергии, которая передаётся в процессе опыта окружающей среде.

Упражнение 18.

1. Определить, какое количество теплоты требуется для нагревания 425 *г* воды на 20° С.
2. На сколько градусов нагреются 5 *кг* воды, если вода получит 40 *ккал*?
3. Сколько требуется калорий, чтобы m граммов воды при температуре t_1 нагреть до температуры t_2?
4. В калориметр налито 2 *кг* воды при температуре 15° С. До какой температуры нагреется вода калориметра, если в неё опустить латунную гирю в 500 *г*, нагретую до 100° С? Уд. теплоёмкость латуни 0,088 $\frac{ккал}{кг \cdot град}$.
5. Имеются одинакового объёма куски меди, олова и алюминия. Какой из этих кусков обладает наибольшей и какой наименьшей теплоёмкостью?
6. В калориметр было налито 450 *г* воды, температура которой 20° С. Когда в эту воду погрузили 200 *г* стальных опилок, нагретых до 100° С, температура воды стала 24° С. Определить удельную теплоёмкость опилок.
7. Медный калориметр весом 100 *г* вмещает 738 *г* воды, температура которой 15° С. В этот калориметр опустили 200 *г* меди при температуре 100° С, после чего температура калориметра поднялась до 17° С. Какова удельная теплоёмкость меди?
8. Стальной шарик массой 10 *г* вынут из печи и опущен в воду при температуре 10° С. Температура воды поднялась до 25° С. Какова была температура печи, если масса воды 50 *г*? Уд. теплоёмкость стали 0,12 $\frac{кал}{г \cdot град}$.
9. В стальной котёл массой 1,5 *кг* налито 5 *кг* воды. Сколько надо калорий, чтобы в этом котле нагреть воду от 15 до 100° С?

75. Развитие взглядов на природу теплоты. В XVIII в. господствовало мнение, что теплота есть особая невидимая и невесомая жидкость, способная переходить из одного тела в другое. Такая жидкость, называвшаяся теплородом, находилась, по мнению сторонников этой гипотезы, во всех телах.

Гипотезы теплорода в своё время придерживались знаменитые учёные — Ньютон, Лавуазье, Лаплас, Гей-Люссак и др. Само название «теплоёмкость» введено было потому, что оно указывало на содержание теплорода.

В то время как большинство учёных XVIII в. принимали гипотезу теплорода, против неё выступил М. В. Ломоносов.

В 1745 г. М. В. Ломоносов опубликовал работу «Размышления о причине теплоты и холода», начинавшуюся так: «Весьма известно, что тепло возбуждается движением: ру́ки от взаимного трения согреваются, дерево загорается, искры вылетают при ударе кремнём о сталь, железо накаливается при ковании его частыми, сильными ударами; по прекращению их тепло уменьшается и полученный огонь потухает... Из всего этого совершенно очевидно, что имеется достаточное основание теплоты в движении. А так как никакое движение без материи происходить не может, то необходимо, чтобы достаточное основание теплоты состояло в движении какой-либо материи».

По Ломоносову, теплота возникает в телах в результате сообщения им движения; следовательно, *сущность теплоты — в движении частиц, образующих тело.*

Учение Ломоносова о природе теплоты нашло признание среди ряда крупнейших учёных его времени. Так, знаменитый математик и физик Эйлер в письме, адресованном Ломоносову, писал: «Всякий знает, что появившиеся до сих пор трактаты о причинах теплоты ещё не разъяснили вполне этого предмета, и занимающиеся его исследованием заслуживают величайшей похвалы. Вас нельзя не поблагодарить за то, что Вы рассеяли мрак, покрывавший доселе этот вопрос».

Знал о работах Ломоносова и известный итальянский физик Вольта. В 1786 г. он отметил «то чрезвычайное остроумие, с которым господин Ломоносов в своё время опроверг теплород».

Дальнейшее развитие и опытное обоснование учение о природе теплоты нашло в работах английских учёных Румфорда и Дэви.

В 1798 г. Румфорд писал: «Когда я присутствовал в мюнхенском арсенале при сверлении пушек, меня поразила высокая температура, которую металл быстро принимал при сверлении, и ещё более высокая температура металлических стружек, которая превышала температуру кипения воды».

Желая убедиться, существует ли теплород, Румфорд произвёл ряд опытов, при которых тщательно изолировал испытуемый предмет от нагревания какими-либо другими предметами. Он сверлил металлический цилиндр, поместив его в ящик, наполненный холодной водой, и убедился, что через короткое время вода начинает кипеть. «Трудно описать недоумение и удивление, отразившееся на лицах присутствующих, когда они увидели, что столь большое количество воды было доведено до кипения без помощи огня».

Румфорд заметил, что, чем дольше работает лошадь, приводящая в движение сверло, тем больше выделяется теплоты. На основании этого наблюдения он сделал вывод, что «нельзя считать веществом то, что можно получить в неограниченном количестве из изолированного тела, и нельзя представить себе теплоту иначе, чем некоторым движением».

В 1802 г. Дэви показал на опыте, что при трении двух кусков льда образуется вода, теплоёмкость которой в два раза больше, чем теплоёмкость льда. Этот опыт Дэви повторяет, помещая кусок льда под колокол воздушного насоса. И в этом случае, хотя лёд не мог ниоткуда получить «теплорода», он обращается в воду, на что затрачивается теплота.

Несмотря на убедительность доводов Ломоносова, Румфорда, Дэви, опровергавших существование теплорода, гипотеза теплорода ещё довольно долго существовала в науке. Для доказательства её несостоятельности потребовались новые опыты, новые научные исследования.

76. Механический эквивалент теплоты. В начале XIX в. в промышленность и транспорт широко внедряются паровые двигатели. Одновременно изыскиваются возможности повышения их экономичности. В связи с этим перед физикой и техникой

ставится вопрос большой практической важности: как при наименьшей затрате топлива в машине совершить возможно больше работы.

Первый шаг в решении этой задачи сделал французский инженер Сади Карно в 1824 г., изучая вопрос о коэффициенте полезного действия паровых машин.

В 1842 г. немецкий учёный Роберт Майер теоретически определил, какое количество механической работы можно получить при затрате одной килокалории теплоты.

В основу своих расчётов Майер положил различие в теплоёмкостях газа. *У газов различают две теплоёмкости: теплоёмкость при постоянном давлении (c_p) и теплоёмкость при постоянном объёме (c_v).*

Теплоёмкость газа при постоянном давлении измеряется количеством теплоты, которое идёт на нагревание данной массы газа на 1° С без изменения его давления.

Теплоёмкость же при постоянном объёме численно равна количеству теплоты, идущей на нагревание данной массы газа на 1° С без изменения объёма, занимаемого газом.

У всякого газа теплоёмкость при постоянном давлении больше теплоёмкости при постоянном объёме. Так, например, для воздуха удельные теплоёмкости c_p и c_v имеют следующие значения:

$$c_p = 0{,}2376\ \frac{ккал}{кг \cdot град}; \qquad c_v = 0{,}1690\ \frac{ккал}{кг \cdot град}.$$

Объясняется это различие в теплоёмкостях газа следующим образом. В процессе нагревания газа при постоянном объёме увеличивается только внутренняя энергия газа.

В процессе нагревания газа при постоянном давлении увеличивается, как и в первом случае, внутренняя энергия газа, но, кроме того, газ при расширении совершает работу.

Проследим ход рассуждений Майера.

Допустим, что в сосуде (рис. 130), площадь основания которого $1\ м^2$, заключён при температуре 0° и давлении 760 *мм рт. ст.* $1\ м^3$ воздуха. Воздух, заключённый в сосуде, закрыт поршнем AB, который Майер в своих рассуждениях считал невесомым.

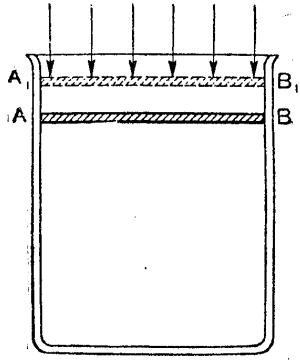


Рис. 130. Рисунок, поясняющий теоретический расчёт механического эквивалента теплоты.

Масса $1\ м^3$ воздуха равна 1,293 *кг*. Если нагреть этот воздух на 1° С, то он расширится и поднимет поршень на $\frac{1}{273}\ м = 0{,}00366\ м$ (в положение A_1B_1).

Перемещая поршень, воздух в сосуде производит работу по преодолению силы атмосферного давления. Так как атмосферное давление равно $1{,}0332\ \frac{кГ}{см^2}$, то сила, действующая на поршень сверху, равна:

$$1{,}0332\ \frac{кГ}{см^2} \cdot 10\,000\ см^2 = 10\,332\ кГ.$$

Работа, совершаемая расширяющимся воздухом по преодолению этой силы, равна:

$$10\,332\ кГ \cdot 0{,}00366\ м = 37{,}82\ кГм.$$

Количество теплоты, идущее на нагревание воздуха в сосуде при постоянном давлении, равно:

$$0{,}2376\,\frac{ккал}{кг\cdot град}\cdot 1{,}293\ кг\cdot 1\ град = 0{,}3071\ ккал.$$

Для нагревания же этого количества воздуха при постоянном объёме требуется:

$$0{,}1690\,\frac{ккал}{кг\cdot град}\cdot 1{,}293\ кг\cdot 1\ град = 0{,}2185\ ккал.$$

За счёт количества теплоты 0,3071 *ккал* — 0,2185 *ккал* = 0,0886 *ккал* газ совершил работу, равную 37,82 *кГм*.

Из этих расчётов вытекает, что 0,0886 *ккал* эквивалентны 37,82 *кГм*. Отсюда количество механической работы, эквивалентное 1 *ккал* теплоты, равно:

$$\frac{37{,}82\ кГм}{0{,}0886\ ккал}\approx 427\,\frac{кГм}{ккал}.$$

Внутреннюю энергию тела, как было установлено в § 71, можно изменять двумя путями: путём совершения работы и путём теплопередачи.

Количество механической работы, которое вызывает такое же изменение внутренней энергии тела, как и сообщение ему единицы количества теплоты, называется механическим эквивалентом теплоты.

Опытные определения механического эквивалента теплоты впервые были произведены Джоулем в период с 1840 по 1849 г. Один из наиболее известных его способов определения механического эквивалента теплоты состоял в следующем.

В калориметр *A* (разрез его показан на рис. 131) наливалась вода. Падающие грузы *W* и *W'* приводили во вращение ось *K* с лопаточками *L*. Калориметр имел перегородки *N*; он был устроен так для того, чтобы увеличить трение подвижной части прибора о воду. Вследствие трения лопаточек о воду последняя нагревалась (температура внутри калориметра измерялась термометром).

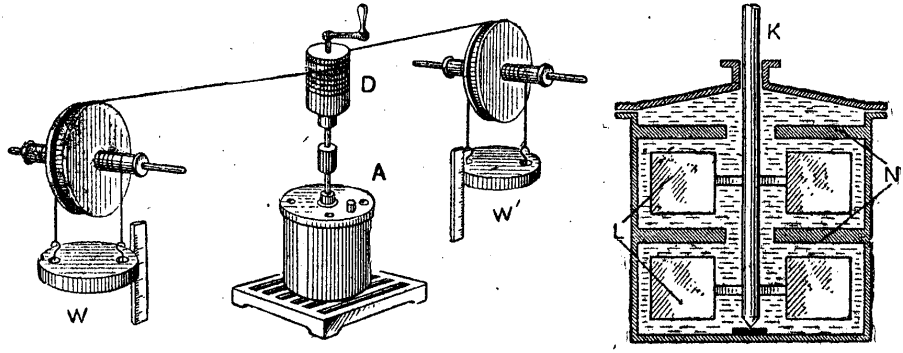


Рис. 131. Схема опыта Джоуля по определению механического эквивалента теплоты. Чтобы вода не увлекалась движением лопаточек, калориметр был разделён перегородками с вырезами в них для прохождения лопаточек.

Джемс Прескотт Джоуль (1818—1889) — выдающийся английский физик, сыграл большую роль в опытном обосновании закона сохранения и превращения энергии.

Он впервые точно определил на опыте механический эквивалент теплоты. Одновременно с русским физиком Э. Х. Ленцем открыл закон, который определяет количество теплоты, выделяемое электрическим током при прохождении по проводнику. Совместно с В. Томсоном открыл явление понижения температуры газа при его расширении.

Именем Джоуля названа единица работы, энергии и количества теплоты — *джоуль*.

По высоте падения h и массе грузов m подсчитывалась произведённая работа $A = mgh$. По повышению температуры в калориметре подсчитывалось количество теплоты Q, выделенное при трении подвижной части калориметра о воду. На эту величину увеличивалась внутренняя энергия воды.

Многочисленные измерения показали, что отношение работы A к количеству теплоты Q, на которое увеличивалась внутренняя энергия воды в результате совершения этой работы, представляет постоянную величину. Эта величина и является механическим эквивалентом теплоты. Механический эквивалент теплоты обозначается буквой J:

$$J = 427\,\frac{кГм}{ккал} = 4{,}1868\,\frac{дж}{кал}.$$

Джоуль заменял воду ртутью и получал тот же результат. Наконец, вместо работы трения лопаточек о воду Джоуль измерял в калориметре работу трения двух кусков металла. Измерения дали ту же величину механического эквивалента теплоты.

Зная механический эквивалент теплоты, легко выразить единицу измерения количества теплоты через единицы работы:

$$1\ кал = 4{,}1868\ дж, \quad \text{или} \quad 1\ ккал = \frac{1}{860}\ квт \cdot ч.$$

77. Закон сохранения и превращения энергии. Рассмотрим более подробно описанный выше опыт Джоуля. В этом опыте потенциальная энергия падающих грузов превращалась в кинетическую энергию вращающихся лопаток; благодаря работе против сил трения кинетическая энергия лопаток превращалась во внутреннюю энергию воды. Мы сталкиваемся здесь со случаем превращения одного вида энергии в другой. Потенциальная энергия падающих грузов превращается во внутреннюю энергию воды, количество

теплоты Q служит мерой превращённой энергии. Таким образом, количество энергии сохраняется при её превращениях в другие виды энергии.

Естественно поставить вопрос: сохраняется ли количество энергии при превращениях других видов энергии, например кинетической, электрической и т. д.? Допустим, что летит пуля массой m со скоростью v. Её кинетическая энергия равна $\frac{mv^2}{2}$. Пуля попала в какой-либо предмет и застряла в нём. Кинетическая энергия пули превращается при этом во внутреннюю энергию пули и предмета, измеряемую количеством теплоты Q, которое вычисляется по известной формуле (§ 73). Если кинетическая энергия при превращении во внутреннюю энергию не теряется, то должно иметь место равенство:

$$\frac{mv^2}{2} = Q,$$

где кинетическая энергия и количество теплоты выражены в одних единицах.

Опыт подтверждает это заключение. Количество энергии сохраняется.

При прохождении электрического тока проводник нагревается: электрическая энергия превращается во внутреннюю энергию проводника. Опыт показывает, что при работе электрического тока в 1 *квт* · *ч* всегда получается количество теплоты, равное 860 *ккал*. Таким образом, количество энергии сохраняется. Этот вывод относится ко всем видам энергии.

Тысячелетняя практика показала, что ни один из видов энергии никогда не возникает из ничего. Это положение подтверждается фактом невозможности осуществления вечного двигателя (см. ч. 1, § 78). Большой опытный материал показал также, что и энергия не исчезает при всех своих превращениях. Все явления природы происходят в соответствии с законом сохранения и превращения энергии, который формулируется так:

Во всех процессах, происходящих в природе, энергия не возникает и не исчезает, она только превращается из одного вида в другой в эквивалентных количествах.

Все формы энергии: кинетическая, потенциальная, электромагнитная, химическая, внутриатомная и др. — способны превращаться друг в друга.

Именно возможность взаимного превращения всех форм энергии обусловливает богатство и разнообразие явлений природы.

Для иллюстрации этого великого закона природы рассмотрим несколько примеров.

Солнечные лучи несут определённый запас энергии. Падая на поверхность Земли, лучи нагревают её. Энергия солнечных лучей при этом превращается во внутреннюю энергию почвы и тел, находящихся на поверхности Земли. Последняя передаётся окружающему Землю воздуху; воздушные массы приходят в движение,

появляется ветер — происходит превращение в механическую (кинетическую) энергию. Часть энергии солнечных лучей поглощается на поверхности Земли листьями растений; при этом в растениях происходят сложные химические реакции, в результате которых образуются органические соединения, — происходит превращение в химическую энергию.

В § 57 и 58 говорилось об использовании энергии движущейся воды; последняя возникает также в результате превращения энергии солнечного излучения.

Наконец, в настоящее время наука овладевает возможностями превращения внутриатомной энергии в другие, нужные для практики виды энергии.

Закон сохранения и превращения энергии широко используется при исследовании явлений природы. Этот закон представляет научную основу для разнообразных расчётов во всех областях техники.

Упражнение 19.

1. Стальной шарик весом 50 *Г* падает с высоты 1,5 *м* на каменную плиту и, отскакивая от неё, поднимается на высоту 1,2 *м*. Почему шарик не поднялся на прежнюю высоту? Какое количество механической энергии превратилось во внутреннюю энергию шарика и плиты?

2. В стеклянный сосуд накачали воздух до давления в 1,5 *ат*. Когда открыли кран, внутри сосуда появился туман, который показывает, что воздух охладился. Почему воздух охладился?

3. Какому количеству работы эквивалентно количество теплоты, получающееся при сгорании 1 *кг* угля? Теплота сгорания угля равна 7000 $\frac{ккал}{кг}$.

4. Какому количеству теплоты соответствует работа лошади, которая передвигает на расстояние 40 *м* вагонетку, прилагая усилие в 50 *кГ*?

5. Какое количество теплоты выделяется при падении неупругого тела массой в 50 *кг* с высоты 4 *м*?

6. Сколько требуется угля на 1 *л. с.* в час, если коэффициент полезного действия машины 20%?

7. Сколько требуется нефти на рейс теплохода, продолжающийся 6 суток, если двигатель теплохода развивает среднюю полезную мощность 4000 *л. с.* и имеет коэффициент полезного действия 20%? Теплота сгорания горючего 11 000 $\frac{ккал}{кг}$.

8. Сколько теплоты выделяется при ударе молота весом 4,9 *кГ* о предмет, лежащий на наковальне, если скорость молота в момент удара 6 $\frac{м}{сек}$?

9. Сколько требуется угля для паровоза мощностью 1500 *л. с.*, идущего со скоростью 40 $\frac{км}{ч}$, на проезд 200 *км*? Коэффициент полезного действия паровоза 10%.

ГЛАВА VII

ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЁРДЫХ И ЖИДКИХ ТЕЛ

78. Зависимость объёма тел от температуры. Частицы твёрдого тела занимают друг относительно друга определённые положения, но не остаются в покое, а совершают колебания. При нагревании тела увеличивается средняя скорость движения частиц. Средние расстояния между частицами при этом увеличиваются, поэтому увеличиваются линейные размеры тела, а следовательно, увеличивается и его объём.

При охлаждении линейные размеры тела сокращаются и объём его уменьшается.

При нагревании, как известно, тела расширяются, а при охлаждении сжимаются. Качественная сторона этих явлений была уже рассмотрена в начальном курсе физики.

Наша задача теперь — ознакомиться с количественной стороной этих явлений.

79. Линейное расширение твёрдых тел. Твёрдое тело при данной температуре имеет определённую форму и определённые линейные размеры. Увеличение линейных размеров тела при нагревании называется тепловым л и н е й н ы м р а с ш и р е н и е м.

Измерения показывают, что одно и то же тело расширяется при различных температурах по-разному: при высоких температурах обычно сильнее, чем при низких. Но это различие в расширении столь невелико, что при сравнительно небольших изменениях температуры им можно пренебречь и считать, что изменение размеров тела пропорционально изменению температуры.

В начальном курсе физики было установлено, что различные вещества по-разному расширяются при нагревании: одни сильнее, другие слабее; железо, например, расширяется сильнее стекла и слабее меди.

Чтобы количественно характеризовать это важное тепловое свойство тел, введена особая величина, называемая к о э ф ф и ц и е н т о м л и н е й н о г о р а с ш и р е н и я.

Пусть твёрдое тело при температуре 0° С имеет длину l_0, а при температуре $t°$ его длина становится l_t. Значит, при изменении температуры на $t°$ длина тела увеличивается на $l_t - l_0$. Предполагая, что увеличение длины при нагревании на каждый градус идёт

равномерно, находим, что при нагревании на 1° С вся длина тела увеличилась на $\frac{l_t - l_0}{t}$, а каждая единица длины — на

$$\beta = \frac{l_t - l_0}{l_0 t}. \quad (1)$$

Величина β (греч. «бета»), характеризующая тепловое расширение тела, называется коэффициентом линейного расширения.

Формула (1) показывает, что при $t = 1°$ С и $l_0 = 1$ ед. длины величина β равна $l_t - l_0$, т. е. *коэффициент линейного расширения численно равен удлинению, которое получает при нагревании на* 1° С *стержень, имевший при* 0° С *длину, равную единице длины.*

Из формулы (1) следует, что наименованием коэффициента расширения β является $\frac{1}{град}$.

Формулу (1) можно записать в следующем виде:

$$l_t = l_0(1 + \beta t).$$

Отсюда легко определить длину тела при любой температуре, если известны его начальная длина и коэффициент линейного расширения.

Ниже в таблице приведены коэффициенты линейного расширения некоторых веществ, определённые на опыте.

Вещество	Коэффициенты линейного расширения, $\frac{1}{град}$	Вещество	Коэффициенты линейного расширения, $\frac{1}{град}$
Латунь	0,000018	Инвар (сплав 63,2% Fe,	
Медь	0,000017	36,1% Ni, 0,39% Cu,	
Железо	0,000012	0,39% Mn)	0,0000015
Стекло	0,000009		
Платина	0,000009	Кварцевое стекло	0,0000005

80. Объёмное расширение твёрдых тел. При тепловом расширении твёрдого тела с увеличением линейных размеров тела увеличивается и его объём. Аналогично коэффициенту линейного расширения для характеристики объёмного расширения можно ввести коэффициент объёмного расширения. Опыт показывает, что так же, как и в случае линейного расширения, можно без большой ошибки принять, что приращение объёма тела пропорционально повышению температуры.

Обозначив объём тела при 0° С через V_0, объём при температуре $t°$ через V_t, а коэффициент объёмного расширения через α, найдём:

$$\alpha = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}. \quad (2)$$

При $V_0 = 1$ ед. объёма и $t = 1°$ С величина α равна $V_t - V_0$, т. е. *коэффициент объёмного расширения численно равен приросту объёма тела при нагревании на* 1° С, *если при* 0° С *объём был равен единице объёма.*

По формуле (2), зная объём тела при температуре 0° С, можно вычислить объём его при любой температуре $t°$:

$$V_t = V_0(1 + \alpha t).$$

Установим соотношение между коэффициентами объёмного и линейного расширения.

Допустим, что имеем кубик, ребро которого при 0° С равно 1 *см*. При нагревании на 1° С ребро станет равным $(1 + \beta)$ *см*, а объём кубика увеличится на α *см*^{3}.

Можно написать следующее равенство:

$$1 + \alpha = (1 + \beta)^3.$$

Но

$$(1 + \beta)^3 = 1 + 3\beta + 3\beta^2 + \beta^3.$$

В этой формуле величины β^2 и β^3 настолько малы, что ими можно пренебречь и написать:

$$1 + \alpha = 1 + 3\beta, \quad \text{или} \quad \alpha = 3\beta.$$

Коэффициент объёмного расширения твёрдого тела равен утроенному коэффициенту линейного расширения.

81. Учёт теплового расширения в технике. Из таблицы на странице 124 видно, что коэффициенты расширения твёрдых тел очень малы. Однако самые незначительные изменения размеров тел при изменении температуры вызывают появление огромных сил.

Опыт показывает, что даже для небольшого удлинения твёрдого тела требуются огромные внешние силы. Так, чтобы увеличить длину стального стержня сечением в 1 *см*^{2} приблизительно на 0,0005 его первоначальной длины, необходимо приложить силу в 1000 *кГ*. Но такой же величины расширение этого стержня получается при нагревании его на 50° С. Ясно поэтому, что, расширяясь при нагревании (или сжимаясь при охлаждении) на 50° С, стержень будет оказывать давление около 1000 $\frac{кГ}{см^2}$ на те тела, которые будут препятствовать его расширению (сжатию).

Огромные силы, возникающие при расширении и сжатии твёрдых тел, учитываются в технике. Например, один из концов моста не закрепляют неподвижно, а устанавливают на катках; железнодорожные рельсы не укладывают вплотную, а оставляют между ними просвет; паропроводы подвешивают на крюках, а между отдельными трубами устанавливают компенсаторы, изгибающиеся при удлинении труб паропровода. По этой же

причине котёл паровоза закрепляется только на одном конце, другой же его конец может свободно перемещаться.

Огромное значение имеет расширение от нагревания при точных измерениях. В самом деле, если масштабная линейка или калибр, которыми проверяют размеры изготовленной части машины, значительно изменяют свою величину, то необходимой точности при измерении не получится. Во избежание грубых ошибок при измерении или контроле изготовленные изделия заблаговременно приносят в помещение, где производятся измерения, чтобы они успели принять температуру калибров. Самые калибры и измерительные инструменты делают из материала с очень малым коэффициентом расширения. Таким материалом, например, является особая железо-никелевая сталь — инвар, с коэффициентом расширения 0,0000015.

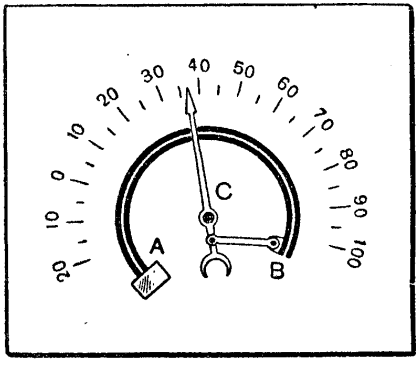


Рис. 132а. Схема устройства металлического термометра.

Как показывает таблица на странице 124, платина и стекло имеют одинаковый коэффициент расширения; поэтому можно вплавлять платину в стекло, причём после охлаждения не происходит ни ослабления связи обоих веществ, ни растрескивания стекла. В электрических лампочках в стекло вплавляется железо-никелевая проволока, имеющая такой же коэффициент расширения, как и стекло.

Заслуживает внимания очень малый коэффициент расширения у кварцевого стекла. Такое стекло выдерживает, не лопаясь и не растрескиваясь, неравномерное нагревание или охлаждение. Так, например, в раскалённую докрасна колбочку из кварцевого стекла можно вливать холодную воду, тогда как колба из обычного стекла при таком опыте лопается. Указанная особенность кварцевого стекла есть следствие малости его коэффициента теплового расширения.

81а. Терморегулятор. Две одинаковые полоски из разных металлов, например из стали и латуни, склёпанные вместе, образуют так называемую биметаллическую пластинку. При нагревании такие пластинки изгибаются вследствие того, что одна расширяется больше другой. Та из полосок, которая расширяется больше, оказывается всегда с выпуклой стороны. Это свойство биметаллических пластинок широко используется для измерения температуры и её регулирования.

1. Металлический термометр. Этот прибор представляет собой биметаллическую дугу (рис. 132а), конец которой *A* прочно закреплён, а конец *B* свободен. Дуга соединена в точке *B* со стрелкой *C*. При изменении температуры дуга закручивается или

раскручивается, двигая соответственно стрелку. Шкала проградуирована по обыкновенному термометру. Если к концу стрелки прикрепить перо, то колебания температуры можно записывать на специальной бумажной ленте. По такому принципу устроен т е р м о г р а ф.

2. Т е р м о с т а т. Так называется прибор для установления постоянной температуры.

На рисунке 132б изображён принцип устройства одного из типов регуляторов температуры. Биметаллическая дуга C при изменении температуры закручивается или раскручивается. К её свободному концу прикреплена металлическая пластинка M, которая при раскручивании дуги прикасается к контакту K, а при закручивании отходит от него. Если, например, контакт K и пластинка M присоединены к концам электрической цепи AA_1, содержащей нагревательный прибор, то при соприкосновении K и M электрическая цепь замкнётся; прибор начнёт нагревать помещение. Биметаллическая дуга C при нагревании начнёт закручиваться и при определённой температуре отсоединит пластинку M от контакта K; цепь разорвётся, нагревание прекратится. При охлаждении дуга C, раскручиваясь, снова заставит включиться нагревательный прибор; таким образом, температура помещения будет поддерживаться на заданном уровне.

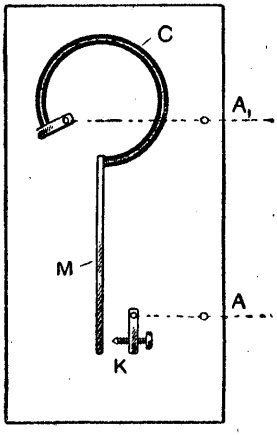


Рис. 132б. Принцип устройства регулятора температуры с биметаллической пластинкой.

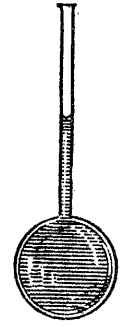


Рис. 132в. Прибор для определения коэффициента расширения жидкостей.

82. Тепловое расширение жидкостей. В отношении жидкостей имеет смысл говорить лишь об объёмном расширении. У жидкостей оно значительно больше, чем у твёрдых тел. Как показывает опыт, зависимость объёма жидкости от температуры выражается такой же формулой, как и для твёрдых тел.

Если при 0° С жидкость занимает объём V_0, то при температуре t её объём V_t будет:

$$V_t = V_0(1 + \alpha t).$$

Для измерения коэффициента расширения жидкости применяется стеклянный сосуд термометрической формы, объём которого известен (рис. 132в). Шарик с трубкой наполняют доверху жидкостью и нагревают весь прибор до определённой температуры; при этом часть жидкости выливается из сосуда. Затем сосуд с жидкостью охлаждают в тающем льду до 0°. При этом жидкость заполнит уже не весь сосуд, и незаполненный объём

покажет, насколько жидкость расширилась при нагревании. Зная коэффициент расширения стекла, можно довольно точно вычислить и коэффициент расширения жидкости.

Коэффициенты расширения некоторых жидкостей:

Эфир	0,00166	Вода (от 20° С и выше)	0,00020
Спирт	0,00110	Вода (от 5 до 8° С)	0,00002
Керосин	0,00100	Ртуть	0,00018

Расширение воды при нагревании отличается от расширения других жидкостей. Если нагревать воду от 0° С, то можно заметить, что при нагревании до 4° С её объём не увеличивается, а уменьшается. При нагревании же выше 4° С объём воды увеличивается. Наибольшую плотность, равную 1 $\frac{г}{см^3}$, вода имеет при 4° С. Изменение плотности воды в зависимости от температуры изображено графически на рисунке 133.

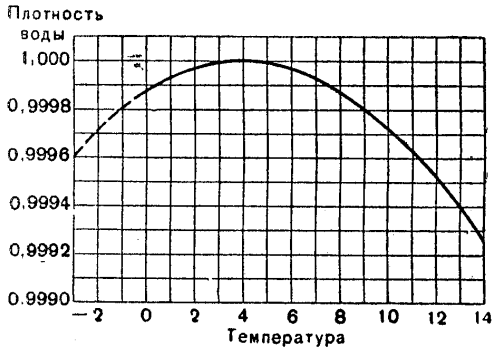


Рис. 133. График изменения плотности воды в зависимости от температуры.

Особенностью расширения воды объясняется то, что вода в прудах и озёрах не промерзает зимой до дна. При охлаждении воды осенью верхние остывшие слои опускаются на дно, а на их место снизу поступают более тёплые слои. Так слои перемещаются только до тех пор, пока вода не примет температуру 4° С. При дальнейшем охлаждении верхние слои не опускаются вниз, а, постепенно охлаждаясь, остаются наверху и наконец замерзают.

Упражнение 20.

1. Паропроводная стальная труба длиной 10 *м* нагревается от 10 до 100° С. Насколько изменяется длина трубы?
2. При нагревании термометра объём стеклянной полости термометра, вмещающей ртуть, увеличивается. Почему столбик ртути в термометре всё же поднимается?
3. Мерная колба, называемая пикнометром, при температуре 0° С вмещает 340 *г* ртути, а при температуре 100° С — 335 *г*. Определить коэффициент расширения материала сосуда.
4. Выразить плотность тела D_t при температуре $t°$ через плотность его D_0 при температуре 0° С.

ГЛАВА VIII

СВОЙСТВА ГАЗОВ

83. Давление газов. Всякий газ давит на оболочку, внутри которой он находится.

Давление, производимое газом на стенки сосуда, объясняется ударами движущихся молекул.

При ударе о стенку молекулы газа отдают ей определённое количество движения; стенка испытывает при этом действие некоторой силы.

Удар каждой отдельной молекулы о стенку сосуда производит очень небольшое действие. Но молекул газа очень много, удары о стенки сосуда происходят беспрерывно, поэтому в результате получается значительное давление.

Хаотичность движения молекул приводит к тому, что давление газа одинаково во всех направлениях.

При нагревании давление газа увеличивается. Так как при этом число молекул газа не изменяется, то увеличение давления можно объяснить только тем, что удары молекул о стенки заключающего газ сосуда делаются при нагревании чаще и что каждый удар становится сильнее. Удары же могут стать чаще и сильнее, если увеличивается скорость движения молекул. Это подтверждается, как мы видели (гл. V), многочисленными опытами.

84. Зависимость между объёмом и давлением газа. Закон Бойля—Мариотта. Состояние газа определяется его объёмом, давлением и температурой. С изменением этих величин меняется и состояние газа. Мы будем рассматривать последовательно процессы, при которых одна из величин, характеризующих состояние газа, постоянна, а две другие меняются.

Изучим сначала такой процесс, при котором давление и объём газа изменяются, а температура остаётся постоянной. Такой процесс называется изотермическим[1].

Итак, рассмотрим, как изменяется давление данной массы газа при изменении его объёма, если температура газа не меняется.

Опыты, устанавливающие эту зависимость, можно произвести на приборе, три положения которого изображены на рисунке 134.

---

[1] От греч. слов: изос — равный, термос — тёплый.

В этом приборе стеклянная трубка A соединена резиновой трубкой с другой стеклянной трубкой B. Трубка A вверху снабжена краном a, обе трубки наполнены ртутью.

Откроем кран a и установим трубку B так, чтобы уровень ртути в трубке A был, например, на середине трубки (положение I). Давление над ртутью в обеих трубках атмосферное; допустим, что оно равно 76 *см рт. ст.* Закроем теперь кран, отделив этим массу воздуха в трубке A от атмосферного воздуха. Таким образом, в этой стадии опыта мы будем иметь в трубке A определённую массу воздуха, находящегося под давлением $p_1 = 76$ *см рт. ст.*

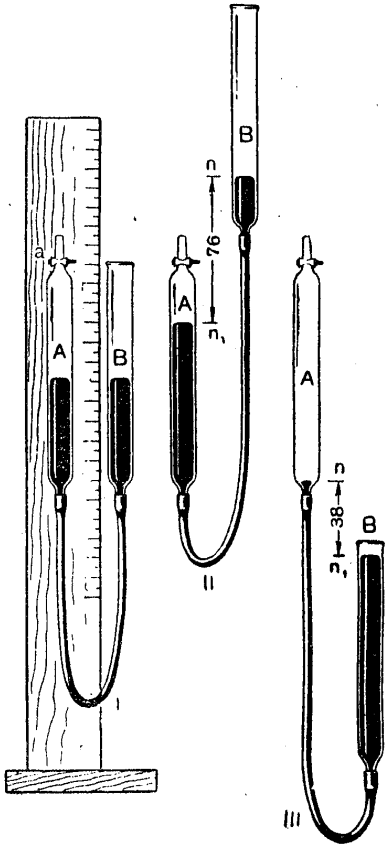


Рис. 134. Прибор для установления зависимости между объёмом и давлением газа (в трёх положениях).

Поднимем теперь трубку B вверх настолько, чтобы объём воздуха в трубке A уменьшился вдвое (положение II). Уровень ртути в трубке B при этом значительно поднимется над уровнем в трубке A.

Рассмотрим теперь, чему будет равно давление воздуха в трубке A. Это давление уравновешивает атмосферное давление и давление всего столба ртути в трубке B, стоящего выше уровня n_1; высота этого столба n_1n оказывается равной 76 *см*. Таким образом, давление воздуха в трубке A уравновешивает не одну, как в первом случае, а две атмосферы ($p_2 = 2$ *ат*).

Значит, с уменьшением объёма данной массы газа в два раза давление его увеличивается в два раза. Если уменьшить объём газа в 1,5; 2,5; 3 раза, то соответственно в 1,5; 2,5; 3 раза увеличится его давление.

Опустим теперь трубку B так, чтобы масса воздуха в трубке A заняла вдвое больший объём (положение III). Уровень ртути в трубке A при этом понизится. Атмосферное давление теперь уравновешивает давление воздуха в трубке A и давление столба ртути от уровня n в трубке A до уровня n_1 в трубке B. Измерения показывают, что высота этого столба ртути равна 38 *см*. Давление, производимое воздухом в трубке A, найдём, вычтя из атмосферного давления давление столба ртути: $p_3 = 76$ *см* $- 38$ *см* $= 38$ *см*; следовательно, $p_3 = 0{,}5$ *ат*.

Итак, при увеличении объёма газа в два раза его давление уменьшается в два раза.

Перемещая трубку B в различные положения и отсчитывая каждый раз объём и давление воздуха в трубке A, найдём, что *при уменьшении объёма исследуемой массы воздуха в некоторое число раз давление его увеличивается во столько же раз.* Температура воздуха при всех опытах остаётся постоянной.

Опыты, проведённые с другими газами, дали те же результаты.

Изучая на опыте зависимость давления газа от его объёма, английский учёный Бойль (1627—1691) и французский учёный Мариотт (1620—1684) независимо один от другого открыли следующий закон.

Давление данной массы газа при неизменной температуре обратно пропорционально объёму газа.

Этот закон называется законом Бойля — Мариотта.

Выразим закон Бойля — Мариотта математически. Пусть температура некоторой массы газа постоянная и пусть

V_1 — объём газа при давлении p_1,

V_2 — » » » » p_2.

Согласно закону Бойля — Мариотта можно написать:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2}{p_1}.$$

Из этой формулы следует, что

$$p_1V_1 = p_2V_2.$$

Полученное равенство можно рассматривать как новое выражение закона Бойля — Мариотта.

Произведение объёма данной массы газа на его давление при неизменной температуре есть величина постоянная.

Изобразим графически изотермическое изменение состояния газа. Для этого по оси абсцисс будем откладывать значения объёмов газа, а по оси ординат — соответствующие им значения давлений. Выберем масштаб так, чтобы начальные значения объёма и давления были равны 1. Тогда начальное состояние газа будет изображено точкой A (рис. 135). Если давление увеличится вдвое, объём уменьшится в два раза, состояние газа изобразится на графике точкой B. При уменьшении первоначального давления вдвое объём удвоится, получим точку C. Беря далее давления в три, четыре и т. д. раз больше или меньше начального, а объёмы соответственно в три, четыре и т. д. раз меньше или больше, получим ряд точек, изображающих различные состояния одной и той же массы газа при одинаковой температуре.

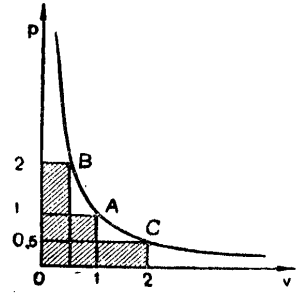


Рис. 135. График изотермического процесса.

Проведя через эти точки линию, получим кривую, которая называется изотермой.

Тщательными исследованиями установлено, что для реально существующих газов закон Бойля — Мариотта имеет лишь приближённое значение. Так, если произведение pV при 1 *ат* равно единице, то при 2 *ат* оно имеет следующие значения:

для воздуха	0,99977
» водорода	1,00026
» окиси углерода	0,99974
» двуокиси углерода	0,99720

При очень больших давлениях (в сотни и тысячи атмосфер) закон Бойля — Мариотта становится совершенно неприменимым; в таких случаях зависимость между объёмом и давлением газа выражается более сложными уравнениями.

Упражнение 21.

1. При давлении в 1 *ат* газ занимает объём в 10 *л*. Каков будет объём этого газа при давлении в 5 *ат*? Температура в обоих случаях одинакова.
2. В газовом баллоне ёмкостью в 10 *л* находится газ под давлением в 20 *ат*. Какой объём займёт этот газ, если, не изменяя температуры, открыть вентиль баллона?
3. Два баллона соединены трубкой с краном. В одном баллоне ёмкостью в 5 *л* находится воздух под давлением в 3 *ат*, другой баллон ёмкостью в 1 *л* пустой. Какое давление установится в каждом из баллонов, если открыть кран (объём трубки с краном во внимание не принимать)? Температура во время опыта постоянна.
4. В футбольный мяч ёмкостью в 2,5 *л* накачивают воздух ручным насосом, забирающим при каждом взмахе 125 $см^3$ воздуха при атмосферном давлении. Каково будет давление внутри мяча, если сделано всего 40 взмахов и мяч до накачивания был пустой? Температуру считать постоянной.
5. Воздушный шар, наполненный газом при давлении 760 *мм рт. ст.*, поднялся в слой воздуха, где давление оказалось равным 500 *мм рт. ст.* Во сколько раз увеличится объём газа, наполняющего шар? Шар изготовлен из эластичной резиновой плёнки. Температуру считать постоянной.
6. Построить изотерму $pV = 8$ *ат* $\cdot$ $см^3$, взяв масштабом на клетчатой бумаге для единиц давления и объёма одну клетку.

85. Зависимость между плотностью газа и его давлением. Плотность газа численно равна массе, заключённой в единице объёма.

Масса газа не меняется при его сжатии или расширении, но объём меняется; следовательно, меняется и плотность газа.

Пусть при постоянной температуре: D_1 — плотность газа при объёме V_1 и давлении p_1, а D_2 — плотность газа при объёме V_2 и давлении p_2.

Если масса газа равна m, то можно написать:

$$D_1 = \frac{m}{V_1};\quad D_2 = \frac{m}{V_2},$$

откуда:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{V_2}{V_1}.$$

Но $\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$ — на основании закона Бойля — Мариотта; поэтому

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{p_1}{p_2}.$$

При постоянной температуре плотность газа прямо пропорциональна его давлению.

Нетрудно понять справедливость этого вывода исходя из молекулярно-кинетической теории. В самом деле, давление газа обусловлено ударами его молекул. Если объём газа уменьшится вдвое, то в новом объёме плотность газа станет вдвое больше. Вдвое увеличится и число ударов молекул о стенки, т. е. давление газа возрастёт в два раза.

Упражнение 22.

1. Как изменяется объём пузырька воздуха, когда этот пузырёк поднимается со дна водоёма на поверхность?
2. Почему подъём на высокую гору вызывает иногда кровотечение из ушей и носа?
3. 100 $м^3$ водорода, находящегося при нормальном давлении, нагнетают в стальной баллон ёмкостью 5 $м^3$. Найти давление в баллоне в $\frac{кГ}{см^2}$.
4. В автомобильную шину ёмкостью 25 000 $см^3$ накачали воздух до давления 8 $\frac{кГ}{см^2}$. Найти плотность и вес воздуха внутри шины, если плотность воздуха при давлении 760 *мм рт. ст.* равна 0,00129 $\frac{г}{см^3}$.
5. В погружённом в воду водолазном колоколе уровень воды на 1033 *см* ниже поверхности воды. Найти плотность воздуха в колоколе, считая процесс сжатия воздуха изотермическим, а плотность воздуха над поверхностью воды 0,00129 $\frac{г}{см^3}$.

86. Зависимость объёма газа от температуры. Закон Гей-Люссака. Как и все тела, газы при нагревании расширяются, причём

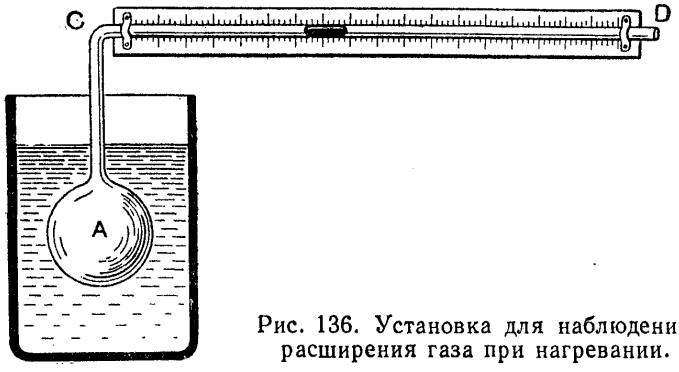


Рис. 136. Установка для наблюдения расширения газа при нагревании.

весьма заметно даже при незначительном нагревании. Это легко обнаружить на следующем простом опыте (рис. 136).

Колба A соединяется с расположенной горизонтально трубкой CD, которая укреплена вдоль шкалы. Внутри этой трубки находится небольшой столбик ртути. Достаточно к колбе прикоснуться рукой, как столбик ртути в трубке CD начнёт двигаться.

При охлаждении колбы столбик ртути перемещается влево, а при нагревании — вправо; следовательно, газ при охлаждении сжимается, а при нагревании расширяется. Зная объём колбы и диаметр трубки, можно измерить увеличение объёма газа.

Жозеф Луи Гей-Люссак (1778—1850)— один из выдающихся французских химиков и физиков. Он открыл ряд важных химических и физических законов, из которых в физике широко известен закон одинакового расширения газов и паров при одинаковом повышении температуры.

Постепенно нагревая газ в колбе, можно установить, что при постоянном давлении изменение объёма данной массы газа прямо пропорционально изменению температуры. Поэтому тепловое расширение газа, так же как и других тел, можно охарактеризовать при помощи коэффициента объёмного расширения.

Пусть при температуре 0° С объём газа равен V_0, а при температуре t — объём V_t. Увеличение объёма, приходящееся на каждую единицу объёма, взятого при 0° С, при нагревании на один градус будет равно:

$$\alpha = \frac{V_t - V_0}{V_0 t},$$

откуда: $V_t = V_0 (1 + \alpha t)$. (1)

Величина α, входящая в написанные выше формулы, называется коэффициентом объёмного расширения газа.

Французский учёный Гей-Люссак, исследуя на опыте тепловое расширение газов, открыл, что ***коэффициент объёмного расширения у всех газов при постоянном давлении одинаков и численно равен*** $\frac{1}{273}$.

В этом отношении расширение газов при нагревании отличается от расширения твёрдых и жидких тел, где, как мы видели (см. § 81 и 82), коэффициент объёмного расширения зависит от химического состава тел.

Положим в формуле (1):

$$t = 1°\text{C}, \quad \alpha = \frac{1}{273}.$$

Мы получим: $V_t = V_0 + \frac{1}{273} V_0$, откуда следует, что ***при нагревании на*** 1° С ***под постоянным давлением объём данной***

массы газа увеличивается на $\frac{1}{273}$ того объёма, который газ занимал при 0° С.

Этот закон получил название закона Гей-Люссака.

Процессы, подобные рассмотренному, протекающие при постоянном давлении, называются изобарными[1].

Формула (1) показывает, что объём газа при температуре $t°$ равен произведению его объёма, взятого при 0° С, на двучлен объёмного расширения $(1 + \alpha t)$.

Пример 1. Объём некоторой массы газа при 0° С равен 10 *л*. Найти объём его при $t = 273°$ С, если давление постоянно.

По условиям задачи нам известен объём газа при 0° С, т. е. $V_0 = 10$ *л*; подставляя числовые данные задачи в формулу $V_t = V_0 (1 + \alpha t)$, найдём, что

$$V_t = 10 \left(1 + \frac{273}{273}\right) л = 20 \ л.$$

Пример 2. При температуре 273° С объём некоторой массы газа равен 10 *л*. Чему будет равен объём этого газа при температуре 546° С, если давление постоянно?

Нам известен объём газа при температуре 273° С; чтобы определить объём этого газа при $t_2 = 546°$ С, надо предварительно найти его объём при 0° С.

Этот объём найдём из равенства:

$$10 \ л = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} \cdot 273\right) л,$$

откуда

$$V_0 = \frac{10 \ л}{2} = 5 \ л.$$

Найдём теперь объём газа при 546°:

$$V_t = 5 \left(1 + \frac{1}{273} \cdot 546\right) л = 15 \ л.$$

Упражнение 23.

1. Какой объём займёт водород при 100° С, если при 0° С он занимает объём 5 *л*? Давление не изменяется.
2. Углекислый газ при температуре 30° С занимает объём 720 *см*³. Каков будет объём этого газа при том же давлении и температуре 0° С?
3. До какой температуры надо нагреть газ, взятый при 0° С и постоянном давлении, чтобы его объём увеличился вдвое?
4. Объём воздуха при температуре 27,3° С равен 100 *л*. Каков будет объём его при температуре 54,6° С? Давление постоянное.
5. Изобразите графически процесс изменения объёма газа при нагревании, выражаемый уравнением: $V_t = V_0 (1 + \alpha t)$ при $p = \text{const}$.

[1] От греч. слов: изос — равный, барос — тяжесть, вес.

87. Зависимость давления газа от температуры. Закон Шарля. Нагревая газ в закрытом цилиндре, например в папиновом котле (рис. 136а), можно по манометру заметить, что давление газа увеличивается. Следя по термометру за повышением температуры, легко установить, что при постоянном объёме давление газа возрастает пропорционально повышению температуры.

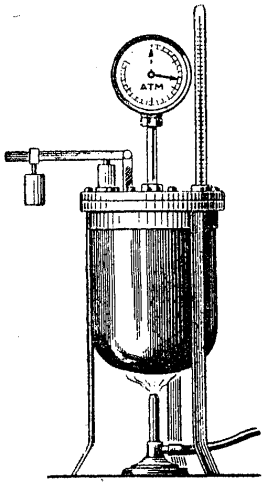


Рис. 136а. При нагревании газа в закрытом цилиндре давление его повышается.

Аналогично тому, как для характеристики теплового расширения газов мы ввели коэффициент объёмного расширения, введём величину, характеризующую изменение давления газа при изменении его температуры.

Обозначим буквой p_0 давление газа при 0° С, а p_t — давление при $t°$. Увеличение давления, приходящееся на каждую единицу начального давления при нагревании на 1° С, будет равно:

$$\gamma = \frac{p_t - p_0}{p_0 t}. \qquad (1)$$

Величина γ (греч. «гамма») называется т е р м и ч е с к и м к о э ф ф и ц и е н т о м д а в л е н и я газа.

Измерения показывают, что *величина термического коэффициента давления для всех газов одинакова и равна* $\frac{1}{273}$.

Определяя из формулы (1) величину p_t, получим:

$$p_t = p_0(1 + \gamma t). \qquad (2)$$

Положим в формуле (2) $\gamma = \frac{1}{273}$, $t = 1°$ С; тогда $p_t = p_0 + \frac{1}{273}p_0$.

Отсюда следует, что ***давление данной массы газа при нагревании на*** 1° С ***при постоянном объёме увеличивается на*** $\frac{1}{273}$ ***того давления, которым обладал газ при*** 0° С.

Этот закон называется законом Ш а р л я, по имени французского учёного, открывшего его в 1787 г.

Из закона Шарля следует, что термический коэффициент давления газа γ равен коэффициенту объёмного расширения α. Это равенство вытекает из закона Бойля — Мариотта. Докажем это.

Пусть некоторая масса газа заключена в цилиндре под поршнем (рис. 137, *а*) и пусть температура её в этом начальном состоянии равна 0°, объём V_0 и давление p_0. Закрепим поршень AB и нагреем газ до температуры $t°$ (рис. 137, *б*); тогда давление газа увеличится и станет равным p_t, объём же его останется прежним.

По закону Шарля: $p_t = p_0(1 + \gamma t)$.

Будем теперь газ нагревать от 0 до $t°$ (рис. 137, *в*), предоставив поршню возможность свободно перемещаться. Давление газа останется таким же, каким было в начальном его состоянии, т. е. p_0, объём же увеличится до V_t. По закону Гей-Люссака:

$$V_t = V_0(1 + \alpha t).$$

Итак, имеем: при температуре $t°$ объём данной массы газа V_0 и давление $p_t = p_0(1 + \gamma t)$; при той же температуре: давление p_0 и объём $V_t = V_0(1 + \alpha t)$. По закону Бойля — Мариотта:

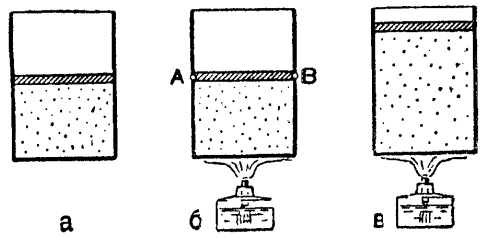


Рис. 137:
а) начальное состояние газа: 0°, V_0, p_0;
б) состояние газа, определяемое величинами: $t°$, V_0, $p_t = p_0(1 + \gamma t)$;
в) состояние газа, определяемое величинами: $t°$, $V_t = V_0(1 + \alpha t)$, p_0.

$$p_0V_0(1 + \gamma t) = p_0V_0(1 + \alpha t).$$

После упрощения этого выражения получаем равенство:

$$\alpha = \gamma.$$

Выразим сначала в виде таблицы, а потом графически зависимость давления газа от температуры. Для этого воспользуемся уравнением:

$$p_t = p_0(1 + \gamma t), \quad \text{или} \quad p_t = p_0 + \gamma p_0 t.$$

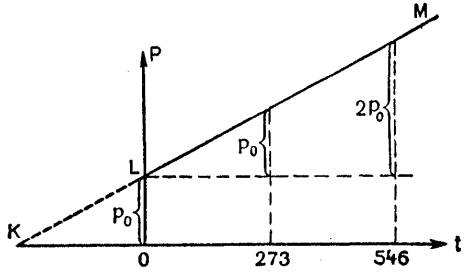


Рис. 138. График зависимости давления газа от температуры.

$t°$	p_t
0	p_0
1	$p_0 + \gamma p_0 \cdot 1$
2	$p_0 + \gamma p_0 \cdot 2$
...	.....
273	$p_0 + p_0$
...	.....
546	$p_0 + 2p_0$

Отложим по оси абсцисс в некотором условном масштабе температуры газа, а по оси ординат — соответствующие этим температурам давления, взятые из написанной выше таблицы.

Соединяя на графике отмеченные точки, получим прямую *LM* (рис. 138), представляющую собой график зависимости давления газа от температуры при постоянном объёме.

Процесс изменения состояния газа, происходящий при неизменном объёме газа, называется изохорным [1] процессом, а линия *LM*, изображающая изменение давления газа при постоян-

[1] От греч. слов: изос — равный, хорема — вместимость.

ном объёме в зависимости от температуры, называется изохорой.

Пример 1. Давление газа при 0° С равно 780 *мм рт. ст.* Определить давление этого газа при температуре 273° С.

По формуле $p_t = p_0 (1 + \gamma t)$ найдём, что

$$p_t = 780\left(1 + \frac{1}{273} \cdot 273\right) = 1560 \text{ мм рт. ст.} \approx 2 \text{ ат.}$$

Пример 2. Чему будет равно давление газа при температуре 546° С, если давление его при температуре 273° С равно 780 *мм рт. ст.*?

В этой задаче прежде всего надо определить давление газа при 0° С. По формуле $p_t = p_0 (1 + \gamma t)$ находим:

$$p_0 = \frac{p_t}{1 + \gamma t} = \frac{780}{1 + \frac{1}{273} \cdot 273} = 390 \text{ мм рт. ст.}$$

Теперь можно определить давление газа при $t = 546°$ С:

$$p_t = 390\left(1 + \frac{1}{273} \cdot 546\right) = 1170 \text{ мм рт. ст.}$$

Законы Гей-Люссака и Шарля так же, как и закон Бойля — Мариотта, лишь приближённо отражают свойства газов. Это можно видеть хотя бы из того факта, что для разных газов величины α и γ несколько различаются между собой (см. таблицу).

Газ при 0° С, 760 *мм рт. ст.*	α	γ
Водород	0,0036600	0,0036613
Гелий	0,0035820	0,0036601
Азот	0,0036732	0,0036744
Двуокись углерода	0,0037414	0,0037262
Воздух	0,0036760	0,0036750

Точные измерения показывают, что для каждого данного газа значения α и γ получаются разные в зависимости от того, в каком температурном интервале и при каком давлении они определены. Однако эти различия очень незначительны, они учитываются лишь при весьма точных расчётах.

Упражнение 24.

1. Построить изохору газа, нагревающегося от 0° С до 100° С, если при 0° С давление газа равно 500 *мм рт. ст.*
2. Чему равно давление водорода при 30° С, если при 0° С его давление 700 *мм рт. ст.*? Объём газа оставался постоянным.
3. Две колбы в 200 *см*^{3} и в 1 *л*, содержащие при 0° С воздух при нормальном атмосферном давлении, закупорены и нагреваются в парах кипящей воды. Будут ли в этих колбах давления разные или одинаковые?

88. Абсолютная шкала температур. Вернёмся ещё раз к графику изменения давления газа с температурой (рис. 138).

Продолжим прямую LM на этом графике до пересечения её с горизонтальной осью, по которой отложены температуры газа; она пересечёт эту ось в точке K. Точка K на этом графике будет обозначать такую температуру газа, при которой давление его равно нулю. Чему равна эта температура?

Обратимся к уравнению $p_t = p_0(1 + \gamma t)$. Положим в этом уравнении $p_t = 0$, т. е. напишем следующее равенство:

$$0 = p_0(1 + \gamma t).$$

Так как давление газа при 0° С не равно нулю ($p_0 \neq 0$), то из написанного равенства следует, что

$$1 + \gamma t = 0,$$

откуда $t = -\frac{1}{\gamma}$, или так как $\gamma = \frac{1}{273}$, то

$$t^\circ = -273^\circ.$$

Итак, давление газа равно нулю при температуре —273° С.

Английский учёный Вильям Томсон (Кельвин) предложил такую шкалу температур, при которой за нуль градусов принята температура —273°. Эта шкала получила название абсолютной шкалы температур или шкалы Кельвина, а нуль градусов этой шкалы, равный —273° (точнее —273°,16), называется абсолютным нулём температур.

В шкале Кельвина величина градуса та же, что и в стоградусной шкале.

Вильям Томсон (Кельвин) (1824—1907) — выдающийся английский физик. Ему принадлежат важные открытия в области теории электричества и теплоты и изобретения, из которых наиболее значительным было усовершенствование телеграфной связи. Он ввёл в физику понятие об абсолютной температуре. Его именем названы градусы шкалы абсолютных температур — *градусы Кельвина*.

Будем обозначать температуру по шкале Кельвина буквой T.

При нормальном атмосферном давлении температура таяния льда по шкале Кельвина $T_0 = 273°$, температура же кипения воды $T = 373°$. Всякая другая температура t° стоградусной шкалы связана с абсолютной температурой T соотношениями:

$$T = t^\circ + 273^\circ;\ t^\circ = T - 273^\circ.$$

Упражнение 25.

1. Переведите на шкалу абсолютных температур следующие температуры по стоградусной шкале: 20°; — 14°; — 260°; 125°.

2. Переведите на стоградусную шкалу следующие температуры по шкале Кельвина: 15°; 124°; 273°; 373°; 1150°.

89. Зависимость между объёмом, давлением и температурой газа. Объединённый закон газового состояния. Мы рассмотрели процессы, в которых одна из трёх величин, характеризующих состояние газа (объём, давление или температура), не меняется.

Мы видели, что если не меняется температура, то давление и объём газа связаны друг с другом законом Бойля — Мариотта. При постоянном давлении объём газа изменяется с изменением температуры по закону Гей-Люссака, и наконец при постоянном объёме давление газа меняется с изменением температуры по закону Шарля.

Однако в природе часто имеют место процессы, когда одновременно меняются все три величины, характеризующие состояние газа. Установим теперь, какая связь существует между объёмом, давлением и температурой.

Пусть для двух каких-либо произвольных состояний некоторой массы газа эти величины будут:

$$1)\ V_1,\ p_1,\ t_1;\quad 2)\ V_2,\ p_2,\ t_2.$$

Из этих состояний изменением величин p, V или t газ можно перевести в любые другие состояния. Будем, например, сохраняя постоянным давление, переводить газ из состояний 1) и 2) в состояния, при которых температура газа будет равна 0° С.

По закону Гей-Люссака объём газа V_1 после уменьшения температуры от t_1 до 0° С будет равен $\frac{V_1}{1+\alpha t_1}$, а объём V_2 после уменьшения температуры от t_2 до 0° С будет $\frac{V_2}{1+\alpha t_2}$. Новые состояния газа выразятся так:

$$1')\ \frac{V_1}{1+\alpha t_1},\ p_1,\ 0°;\quad 2')\ \frac{V_2}{1+\alpha t_2},\ p_2,\ 0°.$$

В обоих этих состояниях температура газа одинакова, поэтому на основании закона Бойля — Мариотта можно написать:

$$\frac{V_1}{1+\alpha t_1}p_1 = \frac{V_2}{1+\alpha t_2}p_2. \qquad (1)$$

Так как величины p, V, t, характеризующие состояние рассматриваемого газа и обозначенные индексами 1 и 2, выбраны были нами произвольно, то равенство (1) справедливо для любых состояний этого газа. Поэтому можно утверждать, что

$$\frac{pV}{1+\alpha t} = \text{const}. \qquad (2)$$

Для данной массы газа произведение давления газа на его объём, делённое на двучлен объёмного расширения, есть величина постоянная.

Выведенная нами зависимость между объёмом, давлением и температурой газа называется объединённым законом газового состояния, а равенство (1) или (2) — уравнением состояния газа.

Уравнение состояния газа можно упростить, введя в него вместо температуры t по стоградусной шкале температуру T по абсолютной шкале температур. Для этого преобразуем уравнение:

$$\frac{p_1V_1}{1+\alpha t_1} = \frac{p_2V_2}{1+\alpha t_2}.$$

Введя в него значение $\alpha = \frac{1}{273}$, получим:

$$\frac{\frac{p_1V_1}{273+t_1}}{273} = \frac{\frac{p_2V_2}{273+t_2}}{273},$$

что после сокращения на $\frac{1}{273}$ даст:

$$\frac{p_1V_1}{273+t_1} = \frac{p_2V_2}{273+t_2}.$$

Но $273 + t_1 = T_1$ и $273 + t_2 = T_2$; следовательно, можно написать:

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}.$$

Это означает, что ***для данной массы газа произведение давления на объём, делённое на абсолютную температуру, постоянно при всех температурах:*** $\frac{pV}{T} = \text{const}$.

В частности, если при температуре $T = 273°$ объём газа равен V_0 и давление его p_0, то можно написать:

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0V_0}{273}.$$

90. Физическая сущность понятия абсолютного нуля. Мы уже отмечали, что реальные газы лишь приближённо следуют законам Гей-Люссака, Шарля и Бойля — Мариотта. Однако можно представить себе газ, для которого эти законы выполнялись бы в точности. Молекулы такого газа можно представить себе в виде упругих шариков исчезающе малого объёма, взаимодействие между которыми осуществляется только при их столкновении друг с другом. В физике такой газ принято называть идеальным газом.

Из уравнения $p_t = p_0 (1 + \gamma t)$ следует, что при $t = -273°$, т. е. при абсолютном нуле, давление газа равно нулю. Но ведь давление

газа есть результат ударов движущихся молекул о стенки сосуда. Следовательно, при температуре абсолютного нуля должно прекратиться тепловое движение молекул идеального газа.

Опыт показывает, что при малых давлениях свойства реальных газов очень близки к свойствам идеального газа. Следовательно, при приближении к температуре абсолютного нуля должно прекратиться тепловое движение молекул и реального газа. Этот вывод относится не только к газам, но и к твёрдым и жидким телам.

Физикой установлено, что такое состояние вещества недостижимо, но к нему можно подойти очень близко. В настоящее время достигнута температура, которая выше абсолютного нуля всего на стотысячную долю градуса.

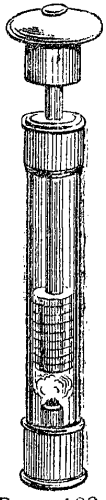


Рис. 139. При быстром сжатии воздух в цилиндре сильно нагревается и легковоспламеняющееся вещество вспыхивает.

91. Изменение температуры газа при быстром расширении и сжатии. Опыты показывают, что при быстром сжатии температура газа повышается, а при быстром расширении понижается.

Увеличение температуры газа при сжатии можно показать на следующем простом опыте. Возьмём толстостенный цилиндрический стеклянный сосуд, внутри которого может двигаться поршень (рис. 139).

При быстром сжатии воздух в сосуде сильно нагревается и легковоспламеняющееся вещество (например, ватка, смоченная эфиром), положенное на дно сосуда, вспыхивает. Такого рода явление используется, например, в двигателях внутреннего сгорания — дизелях: при сжатии воздуха в цилиндре двигателя горючая смесь, введённая в цилиндр, нагревается до температуры воспламенения (работа двигателя описана в § 131).

При быстром же расширении газа температура его понижается. Это можно наблюдать на следующем опыте. Будем накачивать воздух в прочную, закрытую пробкой стеклянную банку, содержащую пары воды. При достижении определённого давления пробка выскочит; при этом воздух, расширяясь, совершит работу и охладится, вследствие чего водяной пар превратится в туман (рис. 140).

Понижение температуры при быстром расширении газа используется для получения сжиженных газов, об этом будет рассказано в § 122.

Изменение температуры тела, как было установлено в § 71, связано с изменением его внутренней энергии. Так как при быстром сжатии температура газа повышается, то внутренняя энергия его при этом увеличивается. Увеличение внутренней энергии газа происходит в результате работы, совершённой при его сжатии. Расширяясь же, газ совершает работу; при этом внутренняя энергия его уменьшается, и если расширение происходит быстро, то температура газа, как мы видели в наших опытах, понижается.

Процесс, происходящий в теле без теплообмена с окружающими его другими телами, называется адиабатным процессом.

Все быстро протекающие процессы практически могут считаться адиабатными.

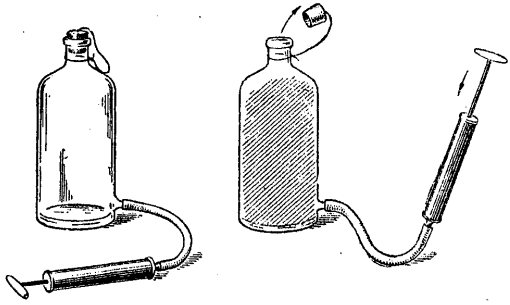


Рис. 140. Сжатый в сосуде воздух, выбрасывая пробку, расширяется. Совершая при этом работу, он охлаждается, вследствие чего водяной пар в сосуде превращается в туман.

92. Применение сжатых газов. Многие сжатые газы в настоящее время находят широкое применение в технике.

Сжатый воздух, например, применяется в работе различных пневматических инструментов: отбойных молотков, заклёпочных молотков, в разбрызгивателях краски и др.

На рисунке 141 показана схема устройства отбойного молотка. Сжатый воздух подаётся в молоток по шлангу *M*. Золотники *Z*, аналогичные применяемым в паровых машинах, направляют его поочерёдно то в заднюю, то в переднюю часть цилиндра. Поэтому воздух давит на поршень *P* то с одной, то с другой стороны, что вызывает быстрое возвратно - поступательное движение поршня и пики молотка *B*. Последняя наносит быстро следующие друг за другом удары, внедряется в уголь и откалывает куски его от массива.

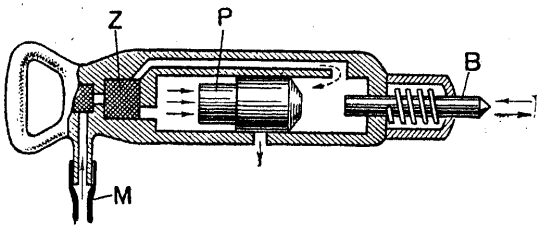


Рис. 141. Схема устройства отбойного молотка.

Существуют также пескоструйные аппараты, которые дают сильную струю воздуха, смешанную с песком. Эти аппараты применяют, например, для очистки стен. Сейчас нередко можно видеть работу специальных аппаратов, применяемых для окраски стен, где краску распыляет сжатый воздух. Сжатым воздухом открывают двери вагонов метро и троллейбусов. Сжатый воздух используют в работе тормозов на транспорте. Схематическое устройство одного из видов пневматического тормоза железнодорожного вагона изображено на рисунке 142.

Компрессор подаёт воздух по магистрали в стальной резервуар *A*. Поршень *B* тормозного цилиндра оказывается под одинаковым давлением справа и слева; поэтому соединённая с ним тормозная колодка *D* отжата от колеса. Если открыть тормозной кран *M*, то находящийся в магистрали под давлением воздух устре-

мится в атмосферу; клапан *К* захлопнется, и, таким образом, стальной резервуар изолируется от магистрали. Теперь давление на поршень *В* справа станет больше, чем давление слева, вследствие чего тормозная колодка прижмётся к ободу колеса. Если теперь кран *М* закрыть и снова подать в магистраль сжатый воздух, то восстановится первоначальное положение.

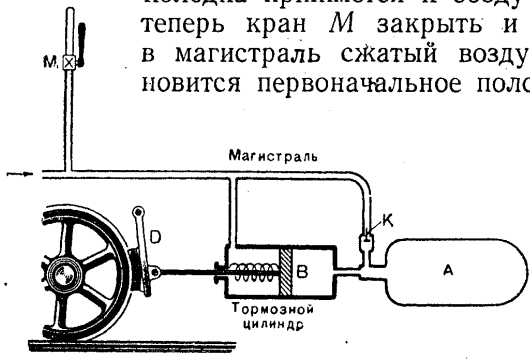


Рис. 142. Схема устройства железнодорожного пневматического тормоза.

В технике применяют не только сжатый воздух, но и некоторые другие газы; так, водород, ацетилен и кислород применяют при газовой сварке; аммиак используют в холодильном деле. Чтобы газы было удобно перевозить, их помещают в прочные стальные баллоны, накачивая до давления 60—200 *ат*.

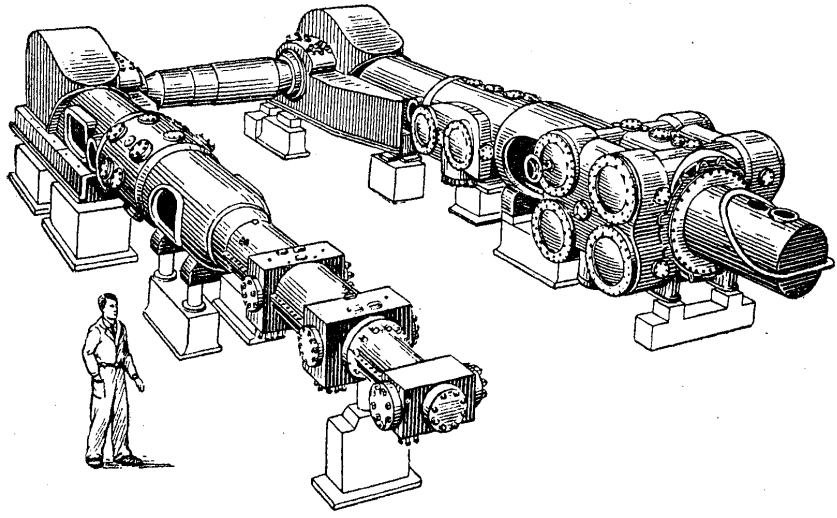


Рис. 142а. Внешний вид мощного компрессора.

Сжатие газов осуществляется с помощью мощных нагнетательных насосов — компрессоров.

На рисунке 143, *а, б* дана схема работы компрессора.

Компрессор состоит из цилиндра с поршнем и двумя клапанами; один из них входной, другой выходной. При движении поршня вниз (рис. 143, *б*) открывается входной клапан и в цилиндр поступает воздух из помещения; при движении поршня вверх (рис. 143, *а*) входной клапан закрывается, вошедший воздух сжимается поршнем и через выходной клапан поступает в стальной баллон для хранения сжатого газа.

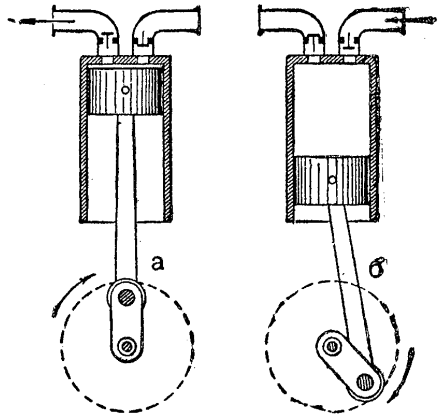


Рис. 143, *а, б*. Схема работы компрессора.

Существуют так называемые многоступенчатые компрессоры, в которых газ последовательно сжимается в трёх или четырёх цилиндрах. Такие компрессоры позволяют получить газ, сжатый до давления в тысячи атмосфер. На рисунке 142а изображён внешний вид одного из типов многоступенчатых компрессоров.

Упражнение 26.

1. Пользуясь уравнением состояния газа $\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}$, получить из него математические выражения для закона Бойля—Мариотта, закона Гей-Люссака и закона Шарля.

2. При 0° С и давлении 760 *мм рт. ст.* воздух занимает объём 5 *л*. Каков будет объём воздуха при давлении 800 *мм рт. ст.* и температуре 20° С?

3. При давлении 1 *ат* и температуре 15° С воздух имеет объём 2 *л*. При каком давлении воздух займёт объём 4 *л*, если температура его станет 20° С?

4. Объём водорода при температуре 50° С и давлении 750 *мм рт. ст.* равен 2,5 *л*. Каков объём той же массы водорода при температуре 0° С и давлении 760 *мм рт. ст.*?

5. До какой температуры нагреется газовая смесь в двигателе внутреннего сгорания, если она в цилиндре под атмосферным давлением при температуре 50° С заполняет объём 40 $дм^3$, а при движении поршня сжимается до объёма 5 $дм^3$ при давлении 15 *ат*?

6. Если плотность газа при температуре 0° С и давлении p_0 равна D_0, то какова будет плотность газа D_t при температуре $t°$ С и давлении p?

7. Начертить график зависимости объёма газа от абсолютной температуры при постоянном давлении. Сравнить его с графиком, который выражается уравнением $p_t = p_0(1 \pm \gamma t)$ (рис. 138).

ГЛАВА IX

СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

93. Молекулярное движение в жидкостях. В жидкостях молекулы расположены значительно более близко друг к другу, чем в газах. Такое заключение можно сделать на основании того, что плотность воды, например, при нормальном давлении и температуре кипения почти в 1670 раз больше, чем плотность её пара. Поэтому характер движения молекул жидкости и многие её свойства в значительной степени определяются силами взаимодействия между молекулами.

Основное свойство жидкости — текучесть. Все жидкости, подобно газам, обладают текучестью; поэтому жидкость принимает форму того сосуда, в котором она находится. В небольших количествах свободная жидкость принимает форму, близкую к шарообразной. Шаровую форму, например, имеют капли дождя или капли, на которые разбивается струя жидкости.

Большая капля ртути, помещённая на горизонтальную стеклянную пластинку, приплюснута, маленькая шарообразна (рис. 144). Если накрыть шарообразную каплю пластинкой, то под действием веса пластинки она сплющивается. Приплюснутость большой капли объясняется преобладанием веса над молекулярными силами в жидкости. Можно ожидать, что если предоставить жидкость действию лишь собственных молекулярных сил, то она примет шарообразную форму. Опыт подтверждает такое предположение.

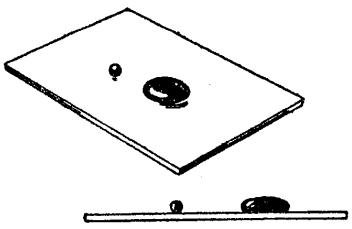


Рис. 144. Большая капля ртути приплюснута, маленькая шарообразна.

Если составить раствор соли в воде, плотность которого равна плотности анилина, и ввести в такой раствор некоторое количество анилина, то он в растворе примет форму шара (рис. 145).

Известно, что поверхность шара — наименьшая при заданном объёме. Жидкость под действием одних молекулярных сил принимает такую форму, при которой её поверхность в данных условиях наименьшая.

Это явление объясняется особенностями действия молекулярных сил на каждую молекулу поверхностного слоя жидкости.

94. Поверхностное натяжение. Рассмотрим действие молекулярных сил на молекулу в глубине и на поверхности жидкости.

На рисунке 146 кружочек *A* изображает молекулу внутри жидкости, а *B* — на поверхности. Молекула *A* со всех сторон окружена другими молекулами той же жидкости, притягивающими её. В среднем все молекулярные силы, действующие на молекулу *A*, взаимно уравновешены. В ином положении находится молекула *B*. Над ней находится газ, плотность которого мала по сравнению с плотностью жидкости. Поэтому действием молекул газа на молекулу *B* можно пренебречь; остаётся действие молекулярных сил жидкости, равнодействующая которых направлена перпендикулярно к поверхности внутрь жидкости. Под действием этих сил часть молекул жидкости уходит с поверхности внутрь жидкости. Поверхностный слой жидкости при этом сокращается и находится в состоянии своеобразного натяжения.

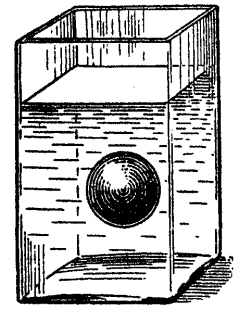


Рис. 145. Капля анилина в растворе соли в воде.

Многие свойства поверхностного слоя жидкости могут быть объяснены, если рассматривать его в виде тонкой плёнки с постоянным натяжением независимо от её формы и размера.

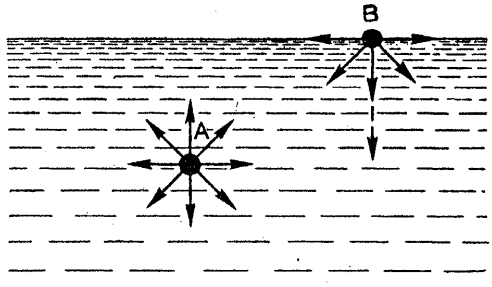


Рис. 146. Силы, действующие на молекулу жидкости внутри и на поверхности жидкости.

Наглядное представление об этом дают следующие опыты с мыльными плёнками.

На рисунке 147 изображено проволочное кольцо с привязанной к нему в двух точках нитью. Получив на кольце жидкую плёнку, можно заметить, что нить лежит на ней свободно (рис. 147, *а*). Но если прорвать плёнку с какой-нибудь стороны нити, то нить натянется, приняв форму дуги окружности, так, как показано на рисунке 147, *б*, или так, как показано на рисунке 147, *в*, в зависимости от того, с какой стороны нити прорвана плёнка.

Натяжение нити можно объяснить, допуская, что со стороны жидкости на все равные элементы нити действуют равные по величине силы, направленные перпендикулярно к соответствующим элементам (рис. 147, *г*). Эти силы называются силами поверхностного натяжения.

Если положить на мыльную плёнку нитяную петлю, смоченную водой, то, когда плёнка цела, петля свободно лежит на ней

(рис. 148). Если же внутри петли проколоть плёнку, то мыльная плёнка, сокращаясь равномерно, растянет петлю, образовав нитяное кольцо.

Обволакивая мыльной плёнкой проволочные каркасы различной формы, можно получать разнообразные фигуры, каждая из которых обладает наименьшей для данной формы поверхностью. Под действием сил поверхностного натяжения мыльная плёнка, обволакивающая проволочный каркас той или другой формы, сокращаясь, принимает наименьшую поверхность из возможных при данных условиях (рис. 149).

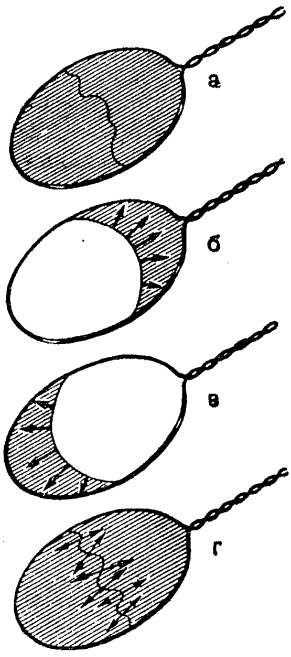


Рис. 147. К понятию силы поверхностного натяжения.

Сила поверхностного натяжения направлена перпендикулярно к любому элементу длины линии, ограничивающей поверхность жидкости, и касательна к её поверхности. Если поверхность жидкости плоская, то вектор силы поверхностного натяжения лежит в плоскости поверхности жидкости.

95. Коэффициент поверхностного натяжения. Дадим теперь количественную характеристику поверхностного натяжения. Проведём следующий опыт. Нальём в бюретку B воды и откроем немного кран K (рис. 150) так, чтобы из бюретки медленно капала вода. Можно заметить, что каждая капля постепенно растёт, отрывается и падает. Если спроецировать конец бюретки с каплей на экран, то видно, что по мере роста капли между ней и жидкостью в трубке образуется шейка, постепенно суживающаяся. Отрыв капли C происходит по окружности шейки AB (рис. 151). Следовательно, эта окружность в момент отрыва является границей поверхностного слоя. Вдоль неё действуют силы поверхностного натяжения, направленные вверх и удерживающие каплю.

Силы поверхностного натяжения распределены по длине линии, поэтому для установления искомой нами количественной характе-

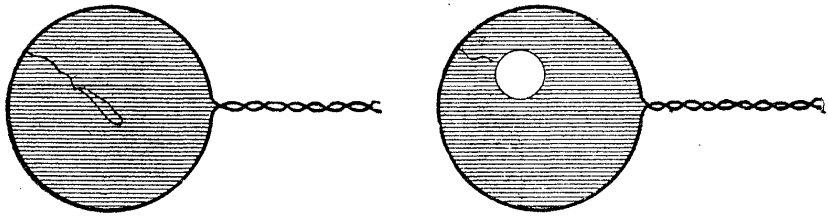


Рис. 148. Петля в мыльной плёнке лежит свободно, но если прорвать плёнку внутри петли, то последняя принимает форму окружности.

ристики может служить величина силы поверхностного натяжения, действующая на единицу длины линии.

Отношение силы поверхностного натяжения к длине границы поверхностного слоя жидкости называется коэффициентом поверхностного натяжения.

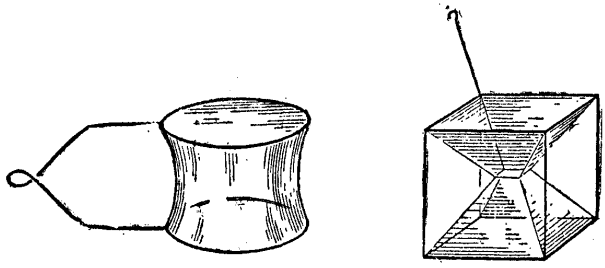


Рис. 149. Плёнка, сокращаясь, принимает наименьшую возможную поверхность.

Обозначим коэффициент поверхностного натяжения буквой σ (греч. «сигма»). Тогда согласно определению:

$$\sigma = \frac{F}{l},$$

где F — сила поверхностного натяжения, а l — длина границы поверхностного слоя. Если силу выражать в динах, а длину в сантиметрах, то σ будет измеряться в $\frac{дин}{см}$.

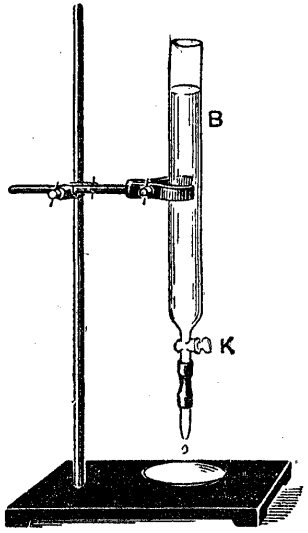


Рис. 150. Вытекающая из бюретки капля воды постепенно растёт, отрывается и падает.

Рассмотрим теперь, как рассчитать коэффициент поверхностного натяжения воды в нашем опыте.

Капля отрывается тогда, когда вес её P становится больше силы поверхностного натяжения F. Если r — радиус шейки AB, то $l = 2\pi r$.

Поскольку непосредственно перед моментом отрыва $F = P$, то мы можем написать:

$$\sigma = \frac{P}{2\pi r}.$$

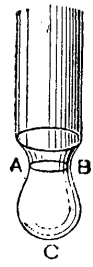


Рис. 151. Отрыв капли происходит по окружности шейки.

Взвесив несколько десятков капель, можно определить средний вес отдельной капли и, приняв r равным внутреннему радиусу трубки (на самом деле r немного меньше этого радиуса), можно найти по этой формуле приближённо величину σ.

В таблице приведены значения коэффициента поверхностного натяжения для некоторых жидкостей.

Жидкость	Температура, °С	Поверхностное натяжение, $\frac{дин}{см}$	Жидкость	Температура, °С	Поверхностное натяжение, $\frac{дин}{см}$
Вода	0	75,5	Ртуть	20	470
Вода	18	74	Свинец жидкий . .	336	442
Вода	35	70	Железо жидкое . .	1267	963
Вода	100	58,8	Платина жидкая .	2000	1819
Раствор мыла . .	20	40	Жидкий водород .	—253	2,1
Спирт	20	22	Жидкий гелий . .	—269	0,12
Эфир	25	17			

Как видно из таблицы, с повышением температуры поверхностное натяжение у воды уменьшается; то же относится ко всем жидкостям.

Очень велико поверхностное натяжение у расплавленных металлов, очень мало у сжиженных газов, особенно у жидкого гелия.

На величину поверхностного натяжения влияют различные причины. Малейшие примеси в жидкости сильно меняют величину поверхностного натяжения, в большинстве случаев уменьшая её. В практике с этим приходится считаться; в частности, при определении коэффициента поверхностного натяжения надо пользоваться исключительно чистыми жидкостями.

Если бросить на поверхность воды мелкие кусочки камфары, то они начнут совершать сложные, весьма запутанные движения. Чем эти движения вызываются?

Кусочки камфары вследствие неправильной формы растворяются в поверхностном слое воды по-разному. Появление же в воде примесей камфары изменяет величину поверхностного натяжения воды, и тем сильнее, чем больше растворяется камфара. Различие в величине поверхностного натяжения воды, окружающей кусочек камфары, и вызывает эти причудливые движения.

96. **Смачивание.** Вынув из стакана с водой опущенную туда чистую стеклянную пластинку, мы заметим, что пластинка покрыта водой. К картонной же пластинке, покрытой парафином или жиром, вода не пристаёт.

При соприкосновении твёрдых тел с жидкостями наблюдаются явления с м а ч и в а н и я или н е с м а ч и в а н и я. Вода смачивает чистое стекло, но не смачивает парафин; ртуть смачивает цинк, но не смачивает чугун.

Смачивание жидкостью твёрдого тела объясняется тем, что сцепление между молекулами жидкости и смачиваемого твёрдого тела сильнее, чем сцепление между молекулами жидкости. В том

случае, когда жидкость не смачивает твёрдого тела, взаимное притяжение молекул жидкости между собой больше, чем притяжение их к молекулам твёрдого тела.

Это различие в притяжении молекул жидкости к твёрдому телу заметно, если налить небольшое количество жидкости на пластинку твёрдого тела. Если жидкость смачивает твёрдое тело, она растекается по поверхности тела (рис. 152, *а*). Если же жидкость не смачивает твёрдого тела, то она не растекается (рис. 152, *б*).

Рис. 152: *а* — жидкость, смачивающая твёрдое тело, растекается по его поверхности; *б* — жидкость, не смачивающая твёрдое тело, не растекается.

Неодинаковое смачивание жидкостями различных тел используют для обогащения руд, т. е. для отделения от руды тех минералов, которые не представляют промышленной ценности (их называют пустой породой). Опыт показывает, что по поверхности таких минералов (кварц, силикаты, окислы железа и др.) вода растекается (имеет место смачивание), образуя тончайшую плёнку. Если бросить кусочки этих минералов в воду, то к ним пузырьки воздуха не прилипнут.

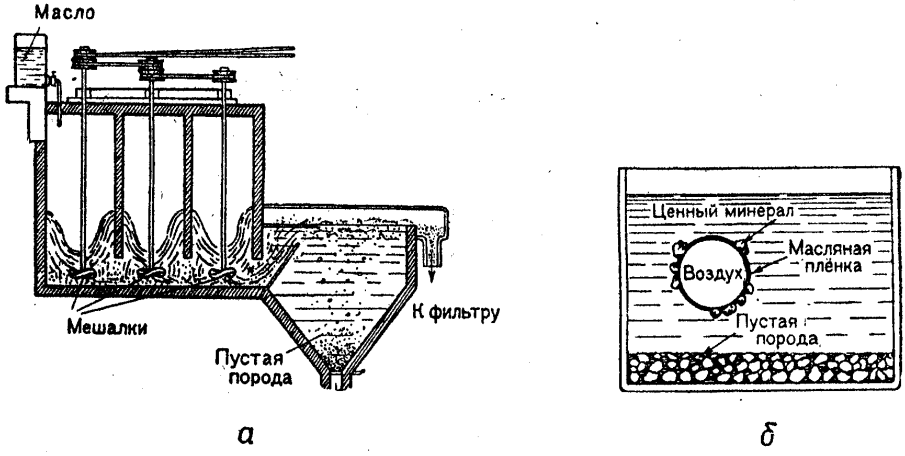


Рис. 153: *а* — схема флотационной установки; *б* — к масляной плёнке, содержащей воздух, прилипают кусочки металла и всплывают вверх; пустая же порода осаждается на дно сосуда.

На поверхности же ценных минералов (свинцовый блеск, медный колчедан, сера, графит и др.) вода собирается в виде капель (имеет место несмачивание), а масляные жидкости образуют тонкие плёнки. Мелкие частицы таких минералов прилипают к пузырькам воздуха, взвешенным в воде.

Для обогащения руды её размалывают в порошок; последний взбалтывают с водой и маслом. Получается пена, состоящая из

пузырьков воздуха внутри масляной плёнки. К плёнке прилипают кусочки ценного минерала, которые поднимаются с пеной вверх, а кусочки пустой породы, не поддерживаемые пузырьками воздуха, оседают на дно камеры (рис. 153, *б*). Такой приём обогащения различных руд и разделения разных металлов носит название флотации (от англ. флотин — всплывание).

Различием сил сцепления между молекулами жидкости, с одной стороны, и молекулами твёрдого тела и жидкости — с другой, обусловливается искривление поверхности жидкости у стенок сосуда.

При смачивании силы сцепления между молекулами твёрдого тела и жидкости немного приподнимают жидкость у стенок сосуда и поверхность жидкости получается вогнутой (рис. 154а). Наоборот, в случае несмачивания силы сцепления между молекулами жидкости, направленные внутрь жидкости, отодвигают её от стенок сосуда и поверхность жидкости получается выпуклой (рис. 154б).

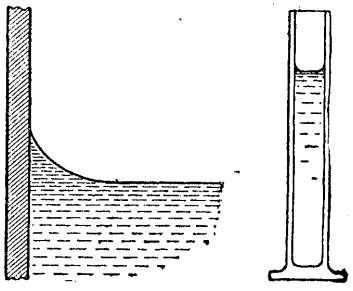


Рис. 154а. В случае смачивания жидкость у стенок немного приподнята. Поверхность её в узких сосудах вогнутая.

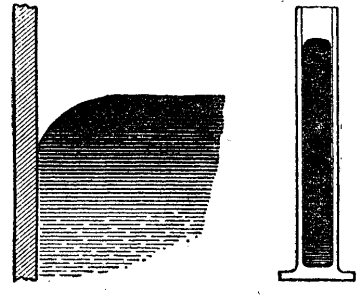


Рис. 154б. В случае несмачивания жидкость у краёв сосуда немного опущена. В узких сосудах поверхность её выпуклая.

97. Капиллярность. Кусок сахару, кирпич, промокательная бумага, полотенце и ряд других тел впитывают в себя воду. Чем это объясняется? Во всех таких телах имеется множество мелких каналов, напоминающих трубки с весьма узким просветом.

Такие трубки называют капиллярными (от лат. капиллус — волос).

Погрузим концы нескольких капиллярных стеклянных трубок в сосуд с водой. Вода в этих трубках поднимается значительно выше уровня воды в сосуде, и тем выше, чем у́же трубка (рис. 155). Если такие же трубки опустить в сосуд со ртутью, то уровень ртути в них окажется ниже уровня в сосуде (рис. 156).

Поверхность жидкости в капиллярных трубках на всём своём протяжении кривая, её называют мениском. Как показывают рисунки 155 и 156, мениск в случае смачивания вогнутый, а при несмачивании выпуклый.

Высота поднятия жидкости в капиллярных трубках может быть легко вычислена.

На рисунке 157 изображён увеличенный разрез капиллярной трубки, погружённой в жидкость. Поверхность жидкости удерживается на стекле внутри трубки по окружности $2\pi r$, причём края поверхности почти вертикальны. Сила поверхностного натяжения действует в вертикальном направлении по длине окружности $2\pi r$ жидкой плёнки, прилипшей к стеклу. Если коэффициент поверхно-

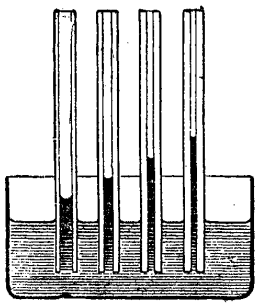


Рис. 155. В случае смачивания уровни жидкости в капиллярных трубках выше уровня жидкости в широком сосуде.

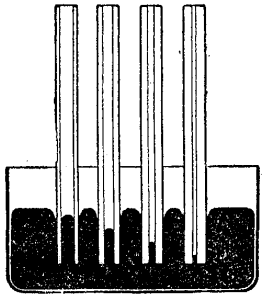


Рис. 156. В случае несмачивания уровни жидкости в капиллярных трубках ниже уровня жидкости в широком сосуде.

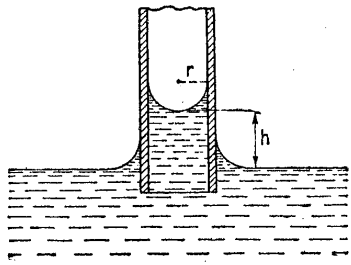


Рис. 157. Столб жидкости высотой h в капиллярной трубке удерживается силами поверхностного натяжения, действующими по окружности радиуса r.

стного натяжения σ, то вся сила, удерживающая жидкость за края поверхностной плёнки, равна $2\pi r\sigma$, где r — радиус внутреннего канала трубки. Эта сила удерживает столб жидкости высотой h, вес которого $\pi r^2 hDg$, где D — плотность жидкости.

Так как жидкость в трубке находится в равновесии, то

$$2\pi r\sigma = \pi r^2 hDg,$$

откуда

$$h = \frac{2\sigma}{rDg}.$$

Высота поднятия жидкости в капиллярной трубке прямо пропорциональна коэффициенту поверхностного натяжения и обратно пропорциональна радиусу трубки и плотности жидкости.

Выведенная нами формула применима и для несмачивающей жидкости, только в этом случае надо говорить не о поднятии, а об опускании жидкости.

Капиллярностью объясняется распространение жидкости по пористым телам, например поднятие жидкости по фитилю, проникновение её в камни фундамента, поднятие влаги в почве.

Капиллярность почвы имеет весьма важное значение для сохранения и перемещения в ней влаги — факт, с которым серьёзно считаются в сельском хозяйстве. Дело в том, что влага, находящаяся в почве, поднимается по капиллярам на поверхность и испаряется. Чтобы уменьшить испарение, нужно разрушить капилляры. Это достигается разрыхлением почвы.

Иногда требуется, наоборот, усилить приток влаги по капиллярам. Тогда почву укатывают, увеличивая этим количество капиллярных каналов.

Особенно важную роль капиллярные явления играют в биологии. Большинство растительных и животных тканей пронизано громадным количеством всякого рода каналов, представляющих собой капиллярные сосуды. Движением жидкостей в этих сосудах объясняется, например, такое биологическое явление, как распространение питательных соков от корня до верхушек растений.

Упражнение 27.

1. Поверхностное натяжение воды $\sigma = 74 \frac{дин}{см}$. На какую высоту поднимается вода в капиллярной трубке, радиус которой 0,05 *мм*?

2. В трубке диаметром 1 *мм* вода поднимается на высоту 30,05 *мм*. Определить по этим данным поверхностное натяжение воды.

ГЛАВА X

СВОЙСТВА ТВЁРДЫХ ТЕЛ

98. Кристаллические и аморфные тела. Различают два рода твёрдых тел: кристаллические и аморфные. Оба эти рода тел существенно отличаются друг от друга по своим физическим свойствам.

Основной признак однородного кристаллического тела — неодинаковость его физических свойств по различным направлениям: теплового расширения, теплопроводности, электропроводности, механической прочности и др. Это свойство кристаллов называют анизотропией[1].

Покроем пластинку гипса и пластинку стекла тонким слоем воска или парафина и прикоснёмся к ним накалённой иглой (рис. 158). Мы увидим, что вокруг точки прикосновения *О* парафин расплавится, причём граница расплавленной площади на кристаллической пластинке гипса представляет собой эллипс (рис. 158, *а*), на стеклянной же пластинке — окружность (рис. 158, *б*).

Этот опыт показывает, что в отличие от стекла теплота в кристаллическом гипсе при его нагревании распространяется в разных направлениях неодинаково.

Существенным внешним признаком кристалла служит его правильная геометрическая форма, причём характерный признак кристаллической формы — одинаковость соответствующих углов между гранями кристаллов одного и того же вещества.

Примеры кристаллических тел: кристаллы металлов, поваренной соли, медного купороса, кварца, квасцов и др. На рисунке 159 изображено семейство кристаллов горного хрусталя.

Если тело представляет собой один кристалл, то оно называется монокристаллом (монос — один).

Тело, состоящее из множества беспорядочно расположенных и сросшихся между собой мелких кристалликов, называется поликристаллическим (поли — много). Физические свойства у поликристаллического тела вследствие беспорядочного расположения кристалликов по всем направлениям одинаковы.

---

[1] Анизотропия — от греч. слов: анизос — неровный, тропос — поворот.

К числу поликристаллических тел относятся металлы. Можно иногда невооружённым глазом рассмотреть мелкие кристаллы в изломе сильно закалённой стали, чугуна, литой латуни. Кристаллическое строение некоторых других металлов можно обнаружить при помощи микроскопа. Но некоторые поликристаллические тела состоят из таких мелких кристалликов, которые нельзя увидеть даже при помощи оптического микроскопа.

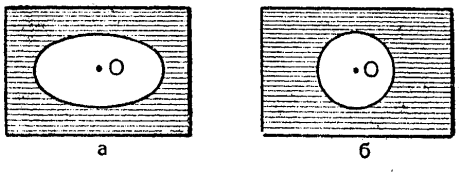


Рис. 158. При прикосновении нагретой иглой воск, покрывающий пластинку, расплавляется (*а* — пластинка кристаллическая, *б* — аморфная).

В отличие от кристаллических тел а м о р ф н ы е[1] тела обладают во всех направлениях одинаковыми физическими свойствами.

Примерами аморфных веществ служат вар и стекло.

Кусок вара от удара молотком рассыпается на осколки, т. е. ведёт себя как хрупкое твёрдое тело, и вместе с тем обнаруживает свойства, присущие жидкостям. Твёрдые куски вара, например, медленно растекаются по горизонтальной поверхности; вар медленно вытекает из опрокинутой бочки. Куски вара, находясь в сосуде, постепенно растекаются, и вар принимает форму сосуда. Тяжёлое тело медленно утопает в варе, а лёгкие тела, помещённые под слой вара, с течением времени всплывают. По этим свойствам вар можно рассматривать как очень густую и вязкую жидкость.

Стекло обладает значительной прочностью и твёрдостью, т. е. свойствами, характерными для твёрдого тела, но по своей молекулярной структуре оно скорее может быть отнесено к жидкостям.

В настоящее время аморфные тела в виде различных п л а с т м а с с широко применяют в технике и в быту.

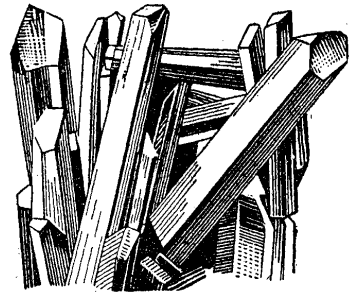


Рис. 159. Семейство кристаллов горного хрусталя.

Бывают случаи, что одно и то же вещество может быть и в кристаллическом и в аморфном состоянии. Сахарный песок, например, имеет кристаллическую структуру. Тот же сахарный песок после расплавления застывает в прозрачный стекловидный леденец, являющийся уже аморфным веществом. С течением времени леденец «засахаривается» — покрывается корочкой кристаллического сахара.

Если расплавленную и нагретую немного выше 300° С серу вылить в холодную воду, то получается мягкая аморфная сера, которая

[1] А м о р ф о с (греч.) — не имеющий формы.

с течением времени переходит в кристаллическую. Обнаруживается с течением времени кристаллизация и в стекле, что можно заметить по образованию в некоторых местах стекла матовых пятен.

Из этих наблюдений можно сделать вывод, что аморфное состояние для твёрдого тела не является устойчивым. Во многих случаях аморфное тело постепенно переходит в кристаллическое.

99. Пространственные решётки. Исследования кристаллов при помощи рентгеновских лучей, начатые в 1912 г., доказали, что правильность форм кристаллов объясняется упорядоченным расположением атомов внутри кристалла.

Если соединить атомы кристалла прямыми линиями, то получится так называемая пространственная решётка. Отдельные атомы, составляющие кристаллы, находятся в узлах — точках пересечения линий, образующих решётку. Часто в узлах пространственной решётки находятся положительно или отрицательно заряженные атомы — ионы. На рисунке 160 изображена схема пространственной решётки поваренной соли. Каждый положительный ион Na находится между отрицательными ионами Cl, и каждый отрицательный ион Cl находится между положительными ионами Na. Внутренние силы, заставляющие ионы Na и Cl держаться друг около друга, — это силы электрического притяжения.

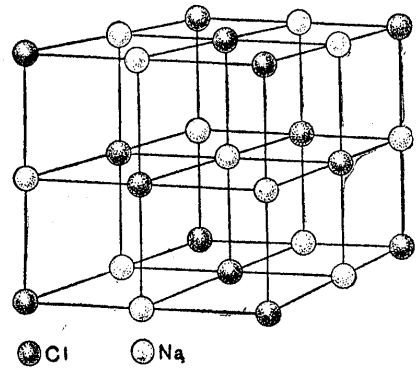


Рис. 160. Пространственная решётка хлористого натрия.

Разнообразие встречающихся форм кристаллов объясняется различными формами пространственных решёток.

С перестройкой пространственной решётки изменяются и физические свойства вещества. Свойство вещества обладать несколькими кристаллическими состояниями называется полиморфизмом. Примером вещества, могущего быть в нескольких кристаллических состояниях, является углерод. При расположении атомов углерода, изображённом на рисунке 161а, мы имеем твёрдый алмаз. При расположении атомов цепочкой, образующей шестиугольник (рис. 161б), получается графит. Прочность графита значительно меньше, чем прочность алмаза. В графите один слой цепочек легко смещается относительно другого, чем и объясняется применение графита как смазывающего материала.

Под влиянием внешних воздействий (давления, температуры) может происходить перестройка кристаллической структуры вещества. Например, мелкие кристаллы железа и стали могут переходить в крупные. Особенно быстро происходит этот процесс при сотрясениях, которым подвергаются железнодорожные рельсы,

мосты и вагонные оси. Размеры же кристалликов существенно влияют на прочность вещества. Сталь, например, состоящая из мелких кристалликов, обладает большей прочностью, чем сталь, состоящая из крупных кристалликов.

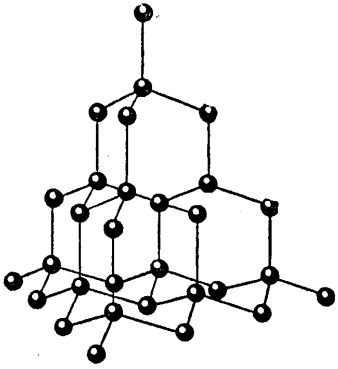


Рис. 161а. Пространственная решётка алмаза.

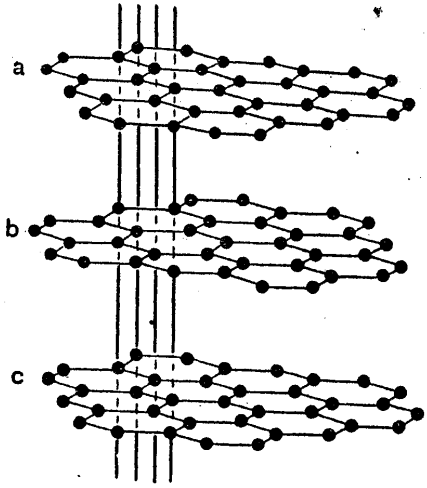


Рис. 161б. Пространственная решётка графита.

100. Деформация твёрдых тел. Между молекулами или атомами твёрдого тела так же, как и между молекулами жидкости, кроме сил притяжения, действуют и силы отталкивания. При сближении частиц увеличиваются силы отталкивания, и тем значительнее, чем сильнее мы сближаем частицы друг с другом. При растяжении тела получают перевес силы притяжения, действующие между частицами. Грубая механическая модель, изображённая на рисунке 162, иллюстрирует взаимодействие частиц кристалла, расположенных в узлах кристаллической решётки и колеблющихся около положений равновесия.

Всякое внешнее, например механическое, воздействие на кристалл нарушает равновесное состояние кристаллической решётки. Оно создаёт внутри кристалла перемещение частиц, что приводит к изменению формы или объёма тела, т. е. к деформации.

Рассмотрим, от чего зависит величина деформации тела. Под величиной деформации надо понимать величину растяжения, сжатия, прогиба и т. д. Обратимся к опыту.

Положим тонкую деревянную линейку концами на две опоры. Линейка лежит горизонтально, она почти прямолинейна. Поставим теперь на середину линейки какой-нибудь груз. Линейка прогнётся, и с увеличением нагрузки этот прогиб будет увеличиваться.

Подвешивая к резиновому жгутику различные грузы, мы обнаружим, что чем больше вес груза, тем сильнее растягивается жгутик.

Следовательно, величина деформации зависит от величины приложенной силы.

Проделав описанный выше опыт с более толстой линейкой, мы заметим, что при одинаковой нагрузке деформация будет меньше. Точно так же толстый резиновый жгутик под действием какого-нибудь груза растягивается меньше, чем тонкий жгутик.

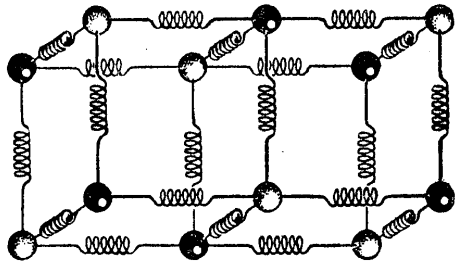


Рис. 162. Механическая модель взаимодействия частиц кристаллической решётки, расположенных в узлах пространственной решётки и колеблющихся около положений равновесия.

Положим опять тонкую линейку на две опоры и будем класть на неё груз в различных местах; мы заметим, что величина деформации будет различна.

Если вместо деревянной линейки взять такого же размера линейку из другого материала и проделать с ней описанные выше опыты, то можно показать, что деформация зависит от материала, из которого изготовлено тело.

Таким образом, опыты показывают, что *величина деформации зависит от размеров тела, места приложения силы, её величины и направления и материала, из которого изготовлено тело.*

101. Упругость и пластичность. Мы видели, что от материала, из которого изготовлено тело, существенно зависит величина его деформации.

К числу чрезвычайно важных свойств материала относятся упругость и пластичность. Что это за свойства материала и какую роль играют они в технике? Обратимся снова к опыту. Изогнём слегка деревянную линейку и отпустим её. Мы увидим, что она распрямится и примет прежнюю форму. Значит, под действием силы линейка деформировалась, а по прекращении действия силы деформация линейки исчезла полностью.

Деформации, исчезающие в теле после прекращения действия сил, называют упругими деформациями.

Свойство же материала, состоящее в том, что тела, изготовленные из него, под действием сил деформируются, а при исчезновении сил восстанавливают свою форму и объём, называется упругостью.

Повторим опыт с деревянной линейкой, но на этот раз согнём её сильнее; мы увидим, что линейка разогнётся, но окончательно не выпрямится. Деформация в ней полностью не исчезнет. Деформация, остающаяся в теле после прекращения действия сил, называется остаточной деформацией.

Остаточная деформация характеризует свойство материала, называемое пластичностью.

Упругость и пластичность присущи всем твёрдым телам.

Если нагружать стальную пружину, то можно обнаружить, что при слабых растяжениях она полностью восстанавливает размер и форму; если же её растянуть сильно, то в ней обнаруживаются остаточные деформации. Сильно сжатый резиновый цилиндр, например, не возвращается к прежним размерам и сохраняет бочкообразную форму.

С другой стороны, если линейку, сделанную из свинца, слегка согнуть и отпустить, то она выпрямляется. Слегка растянутая свинцовая спираль пружинит. В этих случаях свинец проявляет упругие свойства.

Поэтому разделение материалов на упругие и пластичные условно. Однако на практике такое разделение проводится.

Величина, измеряемая отношением нагрузки на брусок к площади его поперечного сечения, называется напряжением и выражается в $\frac{кГ}{см^2}$ или $\frac{кГ}{мм^2}$. Наименьшее напряжение, после снятия которого в образце появляются первые признаки остаточной (пластической) деформации, называется п р е д е л о м у п р у г о с т и.

У тел одинаковой формы и размера, но изготовленных из различных материалов, предел упругости различный. Ниже в таблице показаны пределы упругости некоторых материалов.

Материал и способ обработки	Предел упругости, $\frac{кГ}{см^2}$
Сталь углеродистая катаная	2570
» » кованая	1860
Сталь никель-ванадиевая отпущенная . . .	5830
Железо тянутое	3160
Кольчугалюминий закалённый	1900—2300
Кольчугалюминий холоднокатаный	3500—5000
Свинец	25
Дуб вдоль волокон	250

Возникающая при деформации упругого тела сила называется с и л о й у п р у г о с т и. Сила упругости противодействует внешней силе. Чем больше деформация тела, тем больше сила упругости. Сила упругости исчезает, как только исчезает возникшая в упругом теле деформация.

102. Виды деформаций. Упругие деформации, возникающие в телах, могут быть разнообразными.

Различают четыре основных вида деформаций: р а с т я ж е н и е (или с ж а т и е), с д в и г, к р у ч е н и е и и з г и б.

Рассмотрим каждый из них в отдельности.

1. Р а с т я ж е н и е. Приложим к прямому стержню AB две силы P, равные по величине и направленные по оси стержня в противоположные стороны (рис. 163, *а*). Эти силы растянут стержень. Можно один конец стержня A закрепить неподвижно, а к другому концу B приложить одну силу P (рис. 163, *б*), результат будет такой же, как и в первом случае.

Чем больше величина силы P, приложенной к стержню, тем больше его растяжение.

Разграфим резиновую полоску на квадратики (рис. 164, *а*) и растянем её так, как показано на рисунке 164, *б*. Мы заметим,

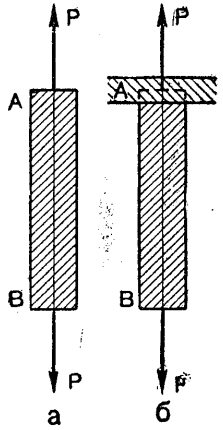


Рис. 163. Под действием сил стержень растягивается.

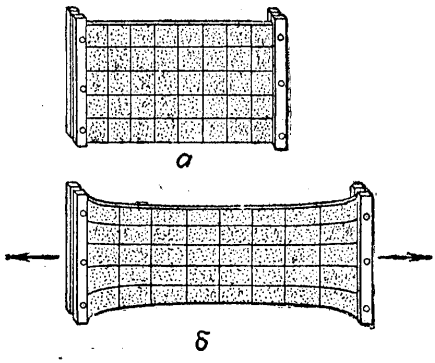


Рис. 164. При растяжении квадратные ячейки, начерченные на резиновой полоске (*а*), превращаются в прямоугольники (*б*).

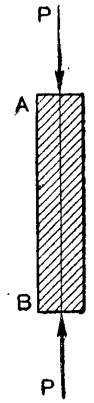


Рис. 165. Стержень под действием сил сжимается.

что одновременно с удлинением полоска сокращается в поперечных размерах. Этот опыт показывает, что при продольном растяжении увеличивается длина тела, но сокращаются поперечные размеры его.

Растяжение испытывают тросы, канаты, цепи в подъёмных транспортных устройствах и мостах, стяжки между вагонами в поездах, балки строительных ферм и т. д.

Если на стержень AB будут действовать силы, направленные навстречу друг другу (рис. 165), то он сожмётся. Длина его при этом уменьшится, а поперечные размеры увеличатся.

Нетрудно видеть, что деформация сжатия противоположна деформации растяжения.

Сжатие испытывают столбы, колонны, стены, фундаменты домов, стержни строительных ферм и др.

2. С д в и г. Тело может подвергаться действию сил, стремящихся сместить одну часть его относительно другой так, как показано на рисунке 166; испытываемая телом деформация в этом случае называется с д в и г о м. Представление о такого рода

деформации даёт сдвиг листов книги, если, положив книгу на стол, перемещать верхнюю часть её параллельно основанию, которое остаётся неподвижным. Все листы книги смещаются друг относительно друга.

Если на брусок действуют силы, направленные навстречу друг другу и сдвигающие одну часть бруска относительно другой так, как показано на рисунке 167, то при достаточной величине этих сил мы наблюдаем с р е з а н и е. Это явление наблюдается, например, при резании ножницами.

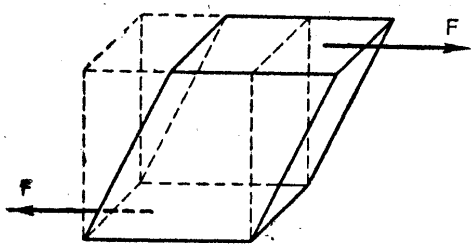


Рис. 166. Деформация сдвига.

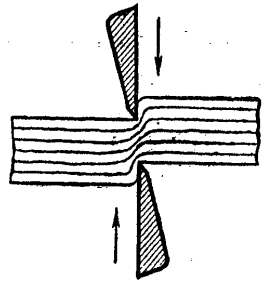


Рис. 167. Срезание.

Деформации сдвига подвергаются, например, болты и заклёпки, соединяющие отдельные металлические конструкции.

3. К р у ч е н и е. Если на стержень, один конец которого закреплён, действует пара сил, лежащая в плоскости, перпендикулярной оси стержня, то получается деформация, которая называется к р у ч е н и е м. При кручении отдельные слои тела остаются параллельными между собой, но повёрнутыми друг относительно друга на некоторый угол (рис. 168). Деформация кручения возникает, например, при завинчивании гаек (рис. 169). Деформации кручения подвергаются валы машин, оси и др.

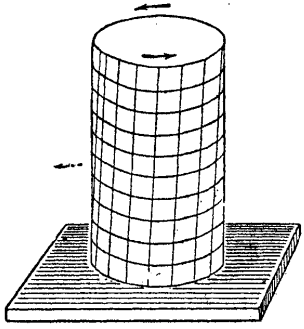


Рис. 168. При кручении слои тела поворачиваются друг относительно друга.

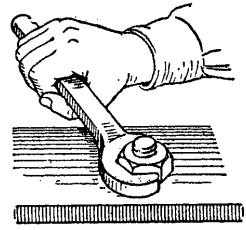


Рис. 169. Пример деформации кручения.

4. И з г и б. Брус, один конец которого закреплён, а на другой действует нагрузка, изгибается. Прямолинейная ось бруса пре-

вращается в криволинейную. Наибольший прогиб в направлении, перпендикулярном оси, называется стрелой прогиба. Прогибается брус и в случае, когда он подпёрт с обоих концов (рис. 170). Если вдоль бруса провести параллельные линии, то при изгибе бруса на вогнутой стороне его линии укорачиваются, а на выпуклой стороне удлиняются. Это наглядно показано на рисунке 171. Между крайними слоями находится слой, который изменил только свою форму, но длина его осталась без изменения. Этот слой называется нейтральным слоем. Вблизи от нейтрального слоя вещество почти не испытывает деформации растяжения или сжатия. Поэтому сплошные брусья, подвергающиеся изгибу, заменяют трубами, балки делают тавровыми (в виде буквы *Т*) или двутавровыми (рис. 172). На рисунке 172 справа показано сечение рельса.

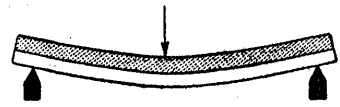


Рис. 170. При изгибе вогнутая сторона бруса сжимается, выпуклая растягивается.

Двутавровая балка представляет собой в сущности широкую балку прямоугольного сечения, из которой удалена часть среднего слоя, который, как мы видели, не подвергается деформации. Поэтому применение таких балок в строительном деле даёт большую экономию материала без ухудшения строительных качеств балок.

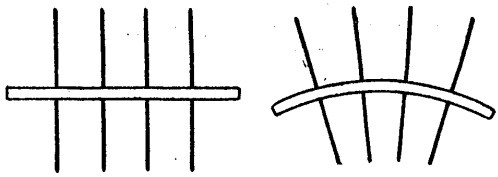


Рис. 171. Расположение спиц показывает, что одна сторона изгибаемого тела растянута, а другая сжата.

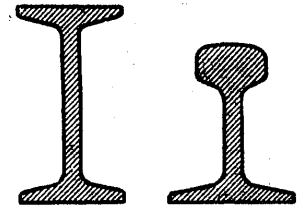


Рис. 172. Слева — сечение двутавровой балки, справа — сечение рельса.

Применяя вместо стержней трубы, не только экономят материал, но и облегчают вес многих установок и машин.

Кости животных имеют, как известно, трубчатое строение, что уменьшает их вес.

В большинстве случаев наблюдаемая на практике деформация представляет собой сочетание нескольких основных деформаций одновременно.

Можно показать, что любой вид деформации можно свести к двум наиболее простым: растяжению (или сжатию) и сдвигу. В случае деформации растяжения силы, действующие на тело, направлены перпендикулярно площади сечения тела, а в случае сдвига они действуют по касательной к этой площади.

102а. Твёрдость. *Под твёрдостью материала понимают его способность оказывать сопротивление проникновению в него другого, более твёрдого тела.*

Твёрдость приходится учитывать при использовании материала в различного рода сооружениях, а также при изготовлении режущих инструментов — свёрл, резцов, фрез и др.

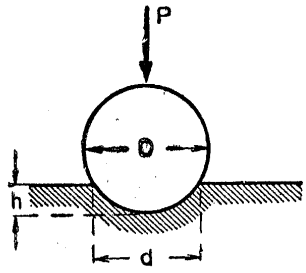


Рис. 172а. К определению твёрдости.

Для определения твёрдости металлов существует несколько способов. Одним из наиболее распространённых является способ, заключающийся во вдавливании стального закалённого шарика в испытуемый металл.

Если вдавливать в испытуемый металл силой P стальной закалённый шарик диаметром D, как показано на рисунке 172а, то шарик проникнет на некоторую глубину h в металл и оставит в нём отпечаток в виде круглой луночки диаметром d.

Величина, характеризующая твёрдость, обозначается через H_B и вычисляется по формуле:

$$H_в = \frac{P}{S} \frac{кГ}{мм^2},$$

где P — нагрузка на шарик в $кГ$;

S — величина поверхности луночки в $мм^2$.

Испытания на твёрдость часто производят на готовых изделиях. Чем меньше толщина изделия, тем меньшего диаметра берётся шарик и тем с меньшей силой он вдавливается в изделие.

Ниже в таблице даны величины, характеризующие твёрдость некоторых металлов.

Материал	Твёрдость, $\frac{кГ}{мм^2}$
Сталь	150—300
Сталь твёрдая	до 850
Чугун	130—300
Алюминий катаный	45
Медь	60
Белый металл (для подшипников)	20—28

Твёрдость кристаллических тел в значительной степени зависит от состояния их поверхности. На поверхности кристаллов обычно имеются небольшие трещины, которые уменьшают твёрдость кристалла.

Исследованиями установлено, что при смачивании кристалла растворами некоторых веществ последние, попадая в эти трещины, способствуют их росту и тем самым уменьшают твёрдость кристалла. Явление понижения твёрдости кристалла при его смачивании используется в бурении твёрдых пород.

102б. Закон Гука. Ко всем видам деформаций, рассмотренным нами в § 102, может быть применён один общий закон, открытый английским учёным Гуком (1635—1703).

Закон Гука формулируется следующим образом:

В пределах упругости величина деформации прямо пропорциональна величине деформирующей силы.

Так, величина растяжения или сжатия стержня будет тем больше, чем больше растягивающая или сжимающая сила; величина прогиба балки будет пропорциональна нагрузке на балку, угол сдвига пропорционален величине действующей на тело силы и т. д.

Рассмотрим подробнее применение закона Гука к деформации растяжения.

На рисунке 172б изображена вертикально подвешенная проволока, свободный конец которой нагружен грузом P.

Пусть l_0 — первоначальная длина проволоки, l — длина её после деформации.

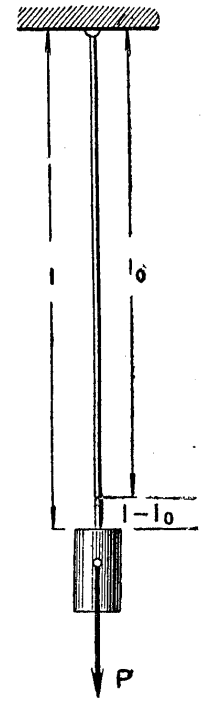


Рис. 172б. К закону Гука.

Величина $l - l_0$ называется абсолютным удлинением проволоки при растяжении. При данной нагрузке абсолютное удлинение зависит от первоначальной длины проволоки. Чем больше эта длина, тем больше и абсолютное удлинение. Следовательно, абсолютное удлинение не может служить мерой деформации вещества. Поэтому за меру деформации принимается удлинение, отнесённое к единице первоначальной длины проволоки, т. е. величина $\frac{l - l_0}{l_0}$. Эта величина называется относительным удлинением.

Обозначим площадь поперечного сечения проволоки буквой S. Разделив нагрузку P на площадь сечения проволоки S, мы получим величину напряжения, которую обозначим буквой σ.

Итак,

$$\sigma = \frac{P}{S}. \qquad (1)$$

Закон Гука для деформации растяжения напишется так: ***относительное удлинение в пределах упругости прямо пропорционально напряжению, т. е.***

$$\frac{l - l_0}{l_0} = \alpha\sigma. \qquad (2)$$

Величина α называется коэффициентом линейного растяжения.

При $\sigma = 1 \frac{кГ}{мм^2}$ $\alpha = \frac{l - l_0}{l_0}$, т. е. *коэффициент линейного растяжения численно равен относительному удлинению при напряжении, равном единице.*

Подставим в формулу (2) вместо σ его выражение, взятое из равенства (1):

$$\frac{l - l_0}{l_0} = \alpha \frac{P}{S}, \quad \text{или} \quad l - l_0 = \alpha \frac{P \cdot l_0}{S}.$$

В технической литературе принято вести расчёты не по коэффициенту растяжения α, а по величине $E = \frac{1}{\alpha}$, эту величину называют модулем упругости.

Какой физический смысл имеет эта величина? Рассмотрим конкретный пример.

Проволока длиной 5 *м* и сечением 2 *мм*^{2} при нагрузке 40 *кГ* удлинилась на 5 *мм*. Определить коэффициент растяжения и модуль упругости проволоки.

По формуле $l - l_0 = \frac{\alpha P l_0}{S}$ находим:

$$5\ мм = \alpha \frac{40\ кГ \cdot 5000\ мм}{2\ мм^2};\quad \alpha = \frac{5 \cdot мм \cdot 2\ мм^2}{40\ кГ \cdot 5000\ мм} = \frac{1}{20\,000}\ \frac{мм^2}{кГ}.$$

Решая пример, мы определили, что длина проволоки сечением 1 *мм*^{2} при нагрузке 1 *кГ* увеличивается на $\frac{1}{20\,000}$ долю первоначальной длины. При нагрузке же 20 000 $\frac{кГ}{мм^2}$ длина проволоки увеличилась бы вдвое. Значит, *модуль упругости обозначает напряжение, которое надо приложить к проволоке, чтобы удвоить её длину.* Практически такая нагрузка совершенно невозможна, так как все материалы, кроме резины, разорвутся гораздо раньше, чем получат такое удлинение.

Значения модуля упругости некоторых материалов приведены в таблице.

Материалы	E, $\frac{кГ}{см^2}$
Сталь	$2{,}0—2{,}2 \cdot 10^6$
Медь	10^6
Чугун	$0{,}75—1{,}6 \cdot 10^6$
Алюминий	$0{,}7 \cdot 10^6$
Свинец	$1{,}7 \cdot 10^5$
Дерево	10^5

Упражнение 28.

1. Круглый стальной брус ($d = 2$ *см*) длиной 16 *м* растягивается силой, равной 3,6 *Т*. Найти удлинение этого бруса и напряжение в нём.
2. Стальная проволока удлиняется на 2 *мм* при действии на неё груза в 32 *кГ*. Вычислить работу силы, вызывающей деформацию удлинения.

103. Прочность. Запас прочности. Первое требование, предъявляемое ко всякому сооружению или изделию, — это прочность. *Прочностью материала называется его свойство сопротивляться действию внешних сил, не разрушаясь.*

Напряжение, при котором материал, подвергнутый деформации, начинает разрушаться, называется пределом прочности.

Для некоторых материалов предел прочности указан ниже в таблице.

Вполне очевидно, что в различных сооружениях во избежание поломок и разрушений нельзя нагружать детали так, чтобы напряжение было равно или близко к пределу прочности. Практически допускаемое напряжение выбирают так, чтобы оно составило лишь некоторую часть от предела прочности.

Число, показывающее, во сколько раз предел прочности больше допускаемого напряжения, называется запасом прочности или коэффициентом безопасности.

Материалы	Предел прочности, $\frac{кГ}{см^2}$	
	при растяжении	при сжатии
Сталь с 0,14% углерода	5000	4000
Сталь инструментальная с 0,96% углерода	9500	6700
Стальная проволока	8000	—
Чугун	1000—2200	3700—8800
Медь	2400	4200
Свинец	130—220	—
Дуб	700	700
Сосна	700	200
Кирпич	20	60

Установлением запаса прочности для различного рода сооружений ведают особые государственные органы, решающие эту важную задачу, пользуясь как техническими, так и экономическими данными. Для стали, например, берут запас прочности в среднем от 2,5 до 4, для железа — от 4 до 5, для чугуна — от 6 до 8, для дерева — от 8 до 10.

Величина запаса прочности выбирается в зависимости от рода сооружения и от характера испытываемой им нагрузки. При спокойных нагрузках запас прочности меньше, чем при переменных нагрузках; он особенно велик в сооружениях, испытывающих различного рода удары.

Упражнение 29.

1. Две проволоки имеют одинаковую длину, сечение одной в два раза больше сечения другой. Первая проволока разрывается при грузе 12 *кГ*. Какая сила требуется для разрыва второй проволоки?

2. Поперечное сечение проволоки равно 0,00258 $см^2$. Она разрывается под действием силы 227 *кГ*. Найти предел прочности этой проволоки.

3. Какая сила нужна для разрыва струны диаметром 0,1 *см*, если предел прочности материала этой струны равен 80 $\frac{кГ}{мм^2}$?

4. Стальная полоса шириной 160 *мм* и толщиной 12 *мм* растягивается силой $F = 20$ *Т*. С каким запасом прочности работает полоса, если предел прочности для стали, из которой она изготовлена, равен 4200 $\frac{кГ}{см^2}$? Предел упругости равен 1800 $\frac{кГ}{см^2}$.

Чему равен наименьший запас прочности, при котором напряжение не превосходит предела упругости?

103а. Значение свойств материалов для их обработки и применения. Металлы обладают более высокой прочностью по сравнению с другими материалами, поэтому детали машин, механизмов и многих сооружений обычно изготовляют из металлов.

Для изготовления режущих и других инструментов применяют специальные инструментальные стали. Измерительные инструменты, например, изготовляют из особых сортов стали, содержащих примеси хрома, никеля, молибдена, марганца. После закалки сталь такого состава обладает повышенной прочностью.

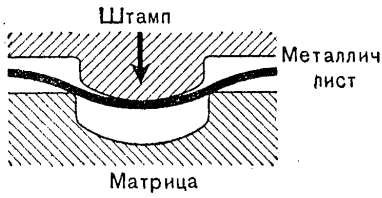


Рис. 173а. Схема штамповки.

Большое значение в машиностроении имеют упругие свойства материалов. При работе машины её детали подвергаются действию различных нагрузок и деформируются под их действием. Очевидно, что эти деформации не должны быть остаточными, иначе нарушилась бы работа машин: одни детали машины укоротились бы, другие, наоборот, удлинились, третьи изогнулись и т. д. В конце концов машина перестала бы работать.

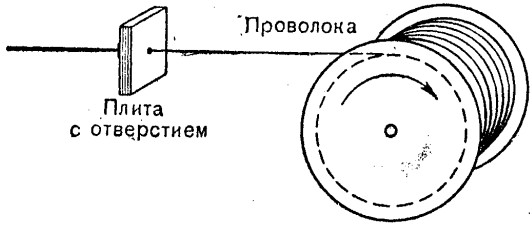


Рис. 173б. Схема волочения.

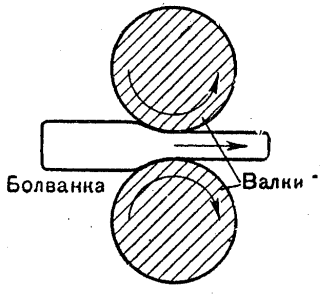


Рис. 173в. Схема прокатки.

Пластические свойства металлов широко используют при их обработке давлением: при прокатке, волочении, штамповке, ковке и т. д.

К о в к о й называется обработка металла давлением, в результате которой изменяется как внешняя форма, так и структура металла.

Существуют два вида ковки: свободная ковка и ковка в штампах.

Ш т а м п о в к а деталей обычно производится с помощью стальных штампов на прессах и молотах (механических или гидравлических). Лист металла, например, кладут между двумя половинками формы: штампом и матрицей (рис. 173а). Гидравлический или другой специальный пресс давит на штамп. Металлический лист изгибается и в результате остаточной деформации принимает необходимую форму.

Подвергать штамповке можно различные материалы: сталь, латунь, алюминий, пластмассу, картон и др. Штамповкой изготовляют посуду, части корпусов автомобилей и самолётов, детали для часовых механизмов и др.

Волочением называется такой вид обработки давлением, при котором обрабатываемый металл проволакивается (протягивается) через ряд постепенно уменьшающихся отверстий в металлических пластинах (волочильных досках). Отверстия (глазки) имеют форму конусов, сделанных в твёрдой стали.

Волочением изготовляют различные сорта проволоки, трубы малого диаметра, прутковый материал различного профиля с точными размерами и др.

На рисунке 173б изображена схема волочения: проволока протягивается через коническое отверстие в плите.

Прокатка производится для получения нужного профиля металла. Путём прокатки из слитков стали, а также из цветных металлов и сплавов получают листы, сортовые и фасонные профили и т. д.

Продукцией прокатки являются или готовые изделия (рельсы, балки и др.), или заготовки для последующей обработки ковкой, штамповкой, волочением или резанием.

Процесс прокатки заключается в том, что нагретый слиток или заготовка — болванка (рис. 173в) — пропускается между вращающимися валками прокатного стана. При этом происходит изменение формы заготовки, а также уменьшение поперечного сечения и увеличение её длины до заданного размера.

Металл, нагретый до высокой температуры, обычно обладает большой пластичностью. С понижением температуры металл становится менее пластичным и с трудом поддаётся деформации. В связи с этим стремятся прокатывать металлы и сплавы в горячем виде. Холодная прокатка применяется лишь для получения тонких изделий (металлические ленты, листы для пружин и др.).

Чрезвычайно ценный строительный материал — дерево. Оно обладает малым удельным весом и высокой прочностью. Недостаток деревянных сооружений — их недолговечность, а во многих случаях громоздкость.

За последние годы разнообразное применение получили искусственные материалы — пластические массы (пластмассы). Для их изготовления применяют различные смолы. Так, небьющееся стекло — плексиглас — изготовляют из смолы, для производства которой используют ацетон, метиловый спирт и синильную кислоту.

Изделия из пластмасс изготавливают главным образом прессованием, применяют также литьё.

Прочность на разрыв у пластмасс порядка 300—600 $\frac{кГ}{мм^2}$, на сжатие — в два-три раза больше. Более подробные сведения о пластмассах изложены в приложении к учебнику.

ГЛАВА XI

ИЗМЕНЕНИЕ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

104. Плавление тел. Плавлением называется процесс превращения вещества из твёрдого состояния в жидкое.

Температура, при которой данное вещество плавится, носит название температуры (или точки) плавления вещества.

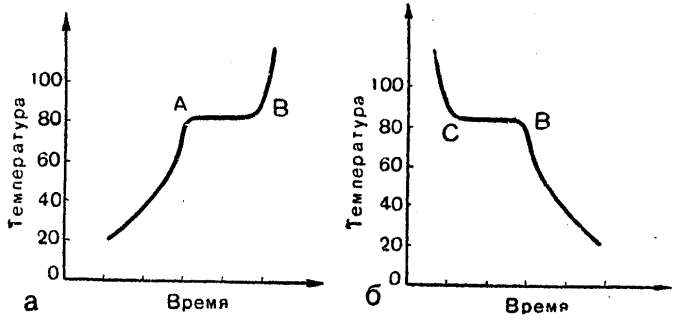


Рис. 174. График температуры плавления (*а*) и отвердевания (*б*) нафталина.

Кристаллические вещества, как например железо, медь, серебро, ртуть, лёд, имеют вполне определённую температуру плавления.

Если нагреть какое-либо кристаллическое тело, то можно заметить, что его температура будет повышаться только до момента начала плавления тела; во время плавления повышения температуры происходить не будет. ***В процессе плавления кристаллического тела, т. е. когда оно существует одновременно как в жидком, так и в твёрдом состоянии, температура тела остаётся неизменной.***

После того как всё тело перейдёт в жидкое состояние, дальнейшее нагревание поведёт к повышению температуры жидкости. На рисунке 174, *а* в качестве примера показан график плавления нафталина. Процессу плавления нафталина соответствует участок кривой *AB*. График же процесса отвердевания нафталина изображён на рисунке 174, *б*. Процессу отвердевания соответствует участок кривой *CB*.

На рисунке 174 видно, что отвердевает нафталин при той же температуре, при которой он плавится. Такой же вывод можно сделать в отношении любого кристаллического тела.

Кристаллические твёрдые тела плавятся и отвердевают при одной и той же определённой для каждого вещества температуре.

Иначе ведут себя аморфные вещества, например смола, воск, канифоль, стекло и др. При нагревании они постепенно становятся мягче, температура их изменяется непрерывно. При отвердевании аморфных тел температура их также понижается непрерывно (рис. 175). Следовательно, *аморфные вещества не имеют определённой температуры плавления и отвердевания.*

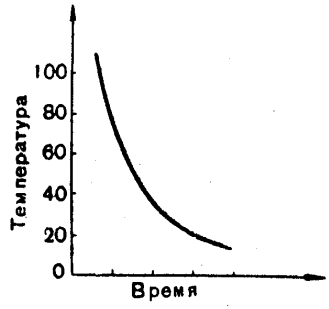


Рис. 175. График изменения температуры застывающей смолы.

Плавление кристаллических тел можно объяснить на основании молекулярно-кинетической теории. Мы уже говорили (см. § 69), что при повышении температуры возрастает средняя скорость хаотического движения частичек вещества. Результатом этого является ослабление сил, связывающих частички в твёрдом теле и обусловливающих его определённую структуру. При приближении к температуре плавления силы эти настолько уменьшаются, что структура твёрдого тела нарушается, разрушается пространственная решётка кристаллов — происходит переход вещества в жидкое состояние.

Температура плавления и отвердевания различных веществ

Название вещества	Температура плавления и отвердевания, °С	Название вещества	Температура плавления и отвердевания, °С
Уголь	3800	Магний	650
Вольфрам	3370	Цинк	419
Платина	1774	Свинец	327
Железо чистое	1530	Висмут	271
Чугун белый	1200	Олово	232
Медь	1083	Калий	63
Золото	1063	Вода	0
Латунь	1000	Ртуть	— 39
Серебро	961	Кислород	—219
Бронза	900	Водород	—257
Алюминий	658	Гелий	—272

105. Удельная теплота плавления. При плавлении происходит разрушение пространственной решётки кристаллического тела, на что расходуется определённое количество энергии от какого-либо внешнего источника. В результате этого внутренняя энергия тела в процессе плавления увеличивается.

Количество теплоты, необходимое для перехода тела из твёрдого состояния в жидкое при температуре плавления, называется теплотой плавления.

В процессе отвердевания тела, наоборот, внутренняя энергия тела уменьшается; часть её передаётся окружающим телам.

Количество теплоты, поглощённое телом при плавлении, равно количеству теплоты, отданному этим телом при отвердевании. В этом факте находит одно из своих выражений закон сохранения и превращения энергии.

Поглощением энергии при таянии льда и выделением её при замерзании воды объясняются те запаздывания в похолодании и потеплении, которые часто имеют место вблизи больших рек и озёр.

Теплоту плавления различных веществ обычно характеризуют количеством теплоты, которое необходимо для расплавления единицы массы данного вещества.

Количество теплоты, необходимое для перехода единицы массы вещества из твёрдого состояния в жидкое при температуре плавления, называется удельной теплотой плавления.

Удельная теплота плавления выражается в $\frac{кал}{г}$ или в $\frac{ккал}{кг}$; в системе единиц СИ — в $\frac{дж}{кг}$; 1 *кал* = 4,1868 *дж* или 1 *ккал* = = 4186,8 *дж*.

Определение удельной теплоты плавления тугоплавких веществ — трудная экспериментальная задача, удельная же теплота легкоплавких веществ может быть определена при помощи калориметра. Покажем на примере льда, как это делается.

Нальём в калориметр m_1 граммов воды при температуре t_1; удельную теплоёмкость воды обозначим через c_1. Пусть масса калориметра m_2 граммов и удельная теплоёмкость его c_2. Бросим в калориметр m граммов льда, начавшего таять, т. е. имеющего температуру 0° С. Помешивая воду, дождёмся, пока весь лёд растает, и отметим окончательную температуру смеси θ° (греч. «тэта»). Из этих данных можно определить удельную теплоту плавления льда; обозначим её через λ (греч. «ламбда»).

Количество теплоты, полученное льдом при обращении его в воду при 0° С:

$$Q = \lambda m.$$

Количество теплоты, полученное водой, образовавшейся от растаявшего льда, при нагревании её от 0° С до θ°:

$$Q_1 = c_1 m (\theta - 0°) = c_1 m \theta.$$

Количество теплоты, отданное водой, бывшей до опыта в калориметре:

$$Q_2 = c_1 m_1 (t_1 - \theta).$$

Количество теплоты, отданное внутренним сосудом калориметра:

$$Q_3 = c_2 m_2 (t_1 - \theta).$$

$$Q + Q_1 = Q_2 + Q_3,$$

$$\lambda m + c_1 m \theta = c_1 m_1 (t_1 - \theta) + c_2 m_2 (t_1 - \theta);$$

$$\lambda = \frac{c_1 m_1 (t_1 - \theta) + c_2 m_2 (t_1 - \theta) - c_1 m \theta}{m}.$$

Опыты дают для удельной теплоты плавления льда величину, равную 80 $\frac{кал}{г}$, а в системе СИ — $80 \cdot 4186{,}8 \frac{дж}{кг} \approx 335 \cdot 10^3 \frac{дж}{кг}$.

Удельная теплота плавления различных веществ

Наименование вещества	Удельная теплота плавления, $\frac{ккал}{кг}$	Наименование вещества	Удельная теплота плавления, $\frac{ккал}{кг}$
Алюминий	92,4	Платина	27
Лёд	80	Чугун серый	23
Никель	65	Олово	14
Железо	66	Свинец	6,3
Медь	42	Ртуть	2,8

106. Изменение объёма тела при плавлении и отвердевании. Опыт показывает, что при плавлении тела его объём изменяется. У большинства веществ объём при плавлении увеличивается, при отвердевании же этих веществ объём их уменьшается. Но имеются вещества, объём которых при плавлении уменьшается, при отвердевании увеличивается. Примером таких веществ является лёд, объём которого уменьшается при плавлении приблизительно на 10% (плотность льда при 0° С около 0,9, воды — около 1). Как известно, это свойство льда и воды имеет огромное значение в природе и технике. Вследствие меньшей плотности льда по сравнению с водой лёд плавает на воде. Обладая плохой теплопроводностью, слой льда защищает лежащую под ним массу воды от охлаждения до температуры отвердевания. Поэтому рыбы и другие живые существа, находящиеся в воде, не гибнут во время морозов.

Водопроводные трубы должны быть защищены от холода, так как образующийся лёд занимает объём больший, чем вода, и трубы могут разорваться.

При изменении давления меняется и температура плавления тел. У веществ, объём которых при плавлении увеличивается, температура плавления с увеличением давления повышается; у таких веществ, как вода и чугун, у которых объём при плавлении уменьшается, температура плавления при повышении давления понижается.

При больших давлениях, порядка тысяч атмосфер, резко меняются многие свойства веществ.

Многие вещества при помощи специально сконструированных прессов подвергали давлению в несколько десятков и даже сотен тысяч атмосфер. При этих огромных давлениях у некоторых веществ обнаруживался ряд необычных свойств. Так, например, вода, будучи сжата до $^3/_4$ её объёма при нормальном давлении, затвердевает, находясь в горячем состоянии, медь под высоким давлением течёт как мягкое сливочное масло, а водород проходит сквозь стальную пластинку толщиной около 5 *см*.

107. Литьё металлов. На свойстве металлов плавиться и отвердевать основано литейное производство.

В литейном производстве путём заполнения жидким металлом специальных форм, в которых металл отвердевает, получают различные детали.

Литые детали широко применяются в станках, машинах и механизмах, составляя от 50 до 85% их веса.

Путём отливки можно изготовлять детали, самые разнообразные по форме и размерам. Для деталей сложной формы отливка является единственным способом их производства.

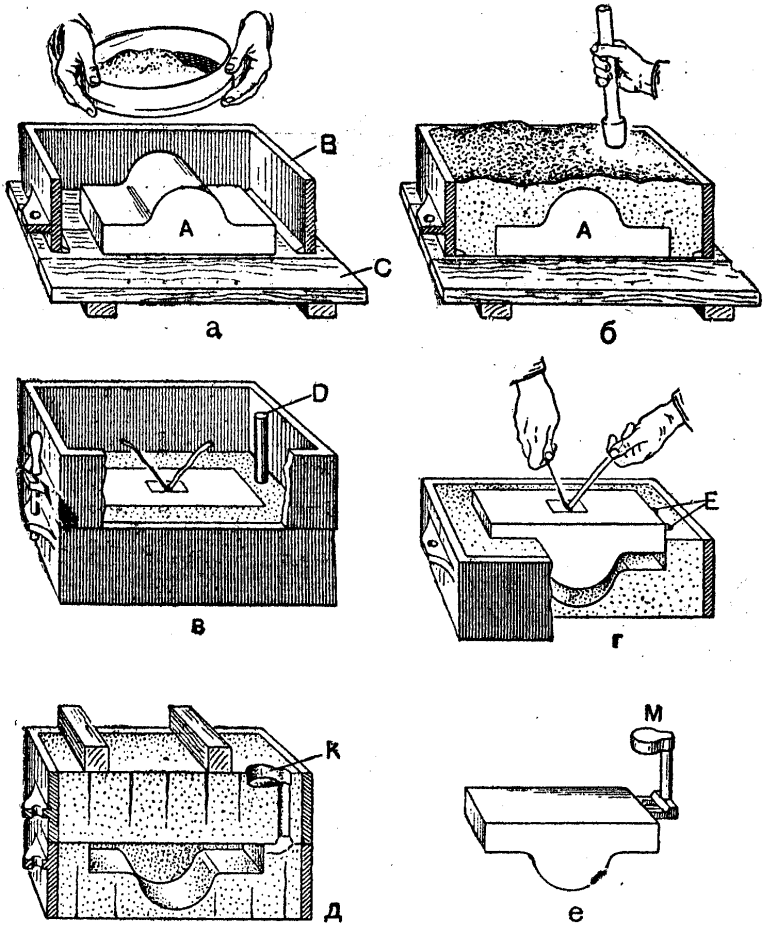


Рис. 176. Последовательные стадии отливки детали.

Для отливки какой-нибудь детали сначала из дерева или из металла изготовляют модель этой детали. Форма модели *А* на рисунке 176 соответствует форме готовой отливки.

Так как все металлы при охлаждении уменьшают свои линейные размеры, модель делают больше отливки на величину усадки. Для различных металлов и сплавов величина усадки составляет от 1 до 2,5%.

Модель детали *А* устанавливают на так называемый подмодельный щиток *С* (рис. 176, *а*) и накрывают опокой *В*. Опоки

представляют собой ящики без дна из чугуна, стали или алюминиевых сплавов. По форме они могут быть прямоугольными, круглыми или фасонными, в зависимости от очертания отливок.

Опоку заполняют формовочной смесью, которая состоит из песка, глины и других материалов. Процентное соотношение составляющих смесь веществ зависит от вида литья. Формовочная смесь должна быть пластична, достаточно прочна, огнеупорна и газопроницаема.

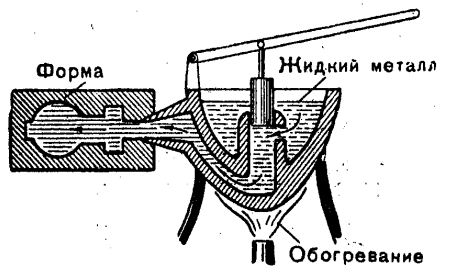


Рис. 177. Схема литья под давлением.

После того как модель установлена на щиток и накрыта опокой, опоку заполняют формовочной смесью, которую уплотняют (рис. 176, *б*). Лишнюю формовочную смесь после уплотнения сгребают с поверхности опоки линейкой. Затем опоку перевёртывают, накладывают на неё вторую (верхнюю) опоку и устанавливают модель стояка *D* (рис. 176, *в*), служащего для образования отверстия, через которое форма заполняется металлом.

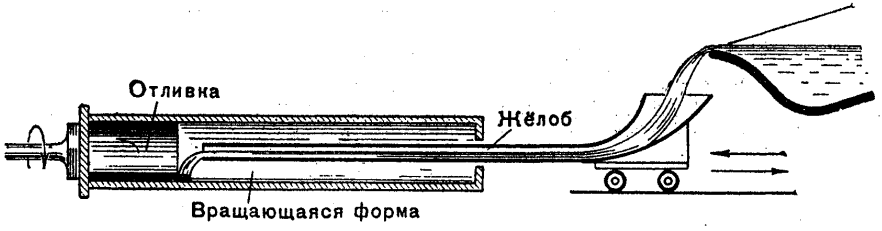


Рис. 178. Схема центробежного литья.

Вторую опоку заполняют формовочной смесью и уплотняют так же, как и первую. Затем снимают верхнюю опоку, вынимают модель стояка и на плоскости разъёма формы прорезают каналы *E*, соединяющие стояк с будущей полостью формы. После этого вынимают модель из формы (рис. 176, *г*). Затем нижнюю половину формы накрывают верхней (рис. 176, *д*). Верхнюю опоку скрепляют с нижней, на форму накладывают груз и через отверстие *K* форму заливают металлом. На рисунке 176, *е* показана отливка с остатком металла *M*, застывшего в стояке; остаток затем обрубается.

Для увеличения прочности и газопроницаемости перед заполнением форм металлом их просушивают на воздухе или в специальных сушильных печах.

На рисунке 177 показана схема литья под давлением. Расплавленный металл, нагнетаемый специальной машиной, поступает в металлическую (стальную) форму под давлением от 5 до 60 *ат*. Металл при этом хорошо заполняет форму, точно воспроизводя её конфигу-

рацию. Литьё под давлением применяется в массовом производстве для цветных сплавов с менее высокой температурой плавления.

На рисунке 178 изображена схема центробежного литья.

При центробежном литье форма, заполненная жидким металлом, быстро вращается; при этом металл плотно заливает все изгибы и углубления формы. Так как действие сил, возникающих при вращении, вызывает расслаивание веществ по их плотности, то содержащиеся в металле газы, как более лёгкие, выделяются во внутреннюю полость; это делает отливку свободной от вредных газовых раковин.

108. Сплавы и их применение в технике. Расплавленные металлы можно смешивать друг с другом. После отвердевания этих смесей получаются с п л а в ы.

Сплавы широко применяют в технике. Всем хорошо известна сталь, представляющая собой сплав железа с углеродом.

Физические свойства сплавов отличаются от физических свойств их составных частей. Сплав обычно бывает твёрже и прочнее, чем его составные части.

Специальные сорта стали состоят из сплава железа и углерода с примесью некоторых редких металлов: хрома, никеля, ванадия, молибдена.

Одни из этих сплавов обладают большой прочностью, другие — твёрдостью или особой упругостью. Нержавеющая сталь, например, очень стойка в химическом отношении, не вступает в химические реакции даже при соприкосновении с кислотами.

К числу прочных сплавов относятся сплавы алюминия с другими металлами. Особой прочностью, например, обладает дюралюминий, состоящий из 94% алюминия, 5% меди, 0,5% магния, 0,5% марганца. Температура плавления его 650° С. Удельный вес дюралюминия втрое меньше удельного веса стали, а сопротивление на разрыв такое же, как у лучших сортов стали. Подобными же свойствами обладает кольчугалюминий. Такие сплавы идут на изделия, в которых надо сочетать лёгкость с прочностью, например на отдельные части автомобилей, самолётов.

Применением алюминия и его сплавов при изготовлении ответственных частей корпуса судна и судового двигателя удаётся значительно уменьшить вес судов, что содействует увеличению их тоннажа. С каждым годом расширяется применение алюминия и его сплавов в разнообразных отраслях производства.

Температура плавления сплавов обычно бывает ниже температуры плавления их главных составных частей.

Можно получить сплав с очень низкой температурой плавления. Например, сплав, состоящий из двух частей висмута ($t_{пл} = 271°$ С), одной части олова ($t_{пл} = 232°$ С) и одной части свинца ($t_{пл} = 327°$ С), плавится уже при 95° С. Чайная ложка, изготовленная из такого сплава, расплавится в кипящей воде. Из подобных сплавов устраивают легкоплавкие предохранительные пробки в клапанах паровых котлов. Если уровень воды в котле понизится ниже

нормы, пробки оказываются выше уровня воды, быстро перегреваются и плавятся. В результате пар из котла получает свободный выход в топку, гасит её, и, таким образом, возможность взрыва котла устраняется.

Легкоплавкие сплавы применяют также во многих предохранительных противопожарных приспособлениях.

Широко применяемый на практике припой для пайки различных изделий из металла состоит из двух частей свинца и одной части олова. Температура плавления его 180° С, т. е. значительно ниже температуры плавления олова и свинца.

Легкоплавкие сплавы, называемые б а б б и т о м, применяют для заливки подшипников. Баббитом залиты, например, подшипники, в которых вращаются валы двигателей автомобилей и тракторов. Если по какой-либо причине смазка окажется недостаточной, то вследствие нагревания при трении вала о подшипник расплавится баббитовый вкладыш подшипника, а вал сохранится.

Упражнение 30.

1. Какое количество теплоты потребуется для превращения 10 *кг* льда в воду при 0° С?
2. Какое количество теплоты потребуется для превращения 150 *кг* льда с температурой — 8° С в воду при температуре 0° С?
3. Рассчитать количество теплоты, требующееся для превращения 20 *кг* льда при — 4° С в воду при 100° С.
4. В банке содержится 2 *кг* воды при температуре 18° С. Какое количество теплоты отдаёт вода охлаждающей смеси, в которую погружена банка, если вся вода в банке превращается в лёд с температурой 0° С?
5. В медный калориметр весом 200 *Г* налито 100 *Г* воды при 16° С. В воду бросили кусочек льда при 0° С весом 9,3 *Г*, который целиком расплавился. Окончательная температура воды после этого установилась в 9° С. Определить на основании этих данных удельную теплоту плавления льда.
6. Какое количество теплоты требуется для расплавления 1 *кг* железа, взятого при температуре 20° С?

109. Испарение. Молекулы жидкости находятся в непрерывном движении. Величина средней кинетической энергии их соответствует температуре жидкости. Беспорядочно двигаясь, молекулы сталкиваются друг с другом, вследствие чего часть из них приобретает энергию, бóльшую их средней кинетической энергии. Получив избыточную энергию, достаточную для преодоления сил молекулярного сцепления, и оказавшись вблизи поверхностного слоя жидкости, такие молекулы могут вылететь из жидкости. Совокупность молекул, вылетевших из жидкости, называют п а р о м данной жидкости, а самый процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное называется п а р о о б р а з о в а н и е м.

Парообразование, происходящее при любых температурах с открытой поверхности жидкости, называется испарением.

Испаряются не только жидкости, но и твёрдые тела, например нафталин и камфара. Испаряется и лёд. Этим объясняется высыхание мокрого платья на морозе. Испарение твёрдых тел называется в о з г о н к о й или с у б л и м а ц и е й.

110. Охлаждение при испарении. При превращении жидкости в пар молекулы жидкости, преодолевая силы сцепления в поверхностном слое, совершают работу. Так как из жидкости улетают молекулы, имеющие большую скорость, то средняя скорость оставшихся молекул жидкости уменьшается, уменьшается их кинетическая энергия. Поэтому, *когда нет притока энергии к жидкости извне, испарение ведёт к уменьшению внутренней энергии жидкости, вследствие чего жидкость охлаждается.*

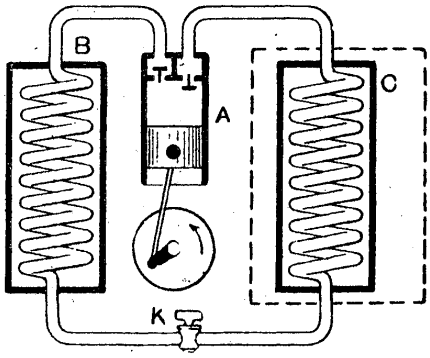


Рис. 178а. Схема устройства компрессионного холодильника.

Охлаждение жидкости при испарении легко наблюдать, обмотав кисеёй или ватой шарик термометра и полив его эфиром. Быстро испаряющийся эфир отнимает часть внутренней энергии шарика термометра, вследствие чего температура последнего значительно понижается. Если налить на деревянную подставку тонкий слой воды и поставить на него стакан с эфиром, то эфир при обдувании воздухом быстро испаряется и его температура настолько понижается, что стакан примерзает к подставке.

Явление охлаждения при испарении жидкости широко используется в практике. При перевозке скоропортящихся продуктов для охлаждения вагонов в специальных устройствах испаряют жидкий аммиак или жидкую двуокись углерода.

Для получения льда в холодильных установках испаряется жидкий аммиак в змеевиках, которые проходят через раствор соли и охлаждают его ниже 0° С. В раствор соли помещают формы из листовой стали, наполненные водой; в этих формах, омываемых охлаждённым рассолом, и образуются блоки льда.

В настоящее время широкое применение в быту получили электрические холодильники. Рассмотрим принцип действия компрессионного холодильника (рис. 178 а). Этот холодильник состоит из трёх основных частей: компрессора *A*, конденсатора *B* и испарителя *C*.

В змеевике-конденсаторе посредством компрессора *A* сжимают какое-нибудь вещество, которое легко переходит из газообразного состояния в жидкое и из жидкого состояния в газообразное. В качестве таких веществ применяют: аммиак, фреон-12 (дифтордихлорметан — CF_2Cl_2), сернистый ангидрид и др.

При сжатии холодильный агент переходит из газообразного состояния в жидкое. Одновременно с этим компрессор создает в змеевике-испарителе *C* разрежение. Туда через регулирующий вентиль *K* устремляется жидкий холодильный агент, который быстро там испаряется. Испарение сопровождается поглощением энергии от стенок змеевика *C*, воздуха, соприкасающегося с ним, и далее от продуктов, находящихся в холодильной камере. Вследствие этого в холодильной камере понижается температура и продукты охлаждаются.

Компрессор приводится в действие электродвигателем.

В жарких странах воду обычно содержат в пористых глиняных сосудах. Вода, просачивающаяся через поры сосуда, испаряется, вследствие чего неиспарившаяся вода в сосуде остаётся холодной.

111. Насыщающий пар. Благодаря собственному тепловому движению, а также движению воздуха вылетевшие из жидкости молекулы постепенно рассеиваются в окружающем пространстве. Вследствие этого испарение с открытой поверхности жидкости происходит до тех пор, пока вся жидкость не испарится.

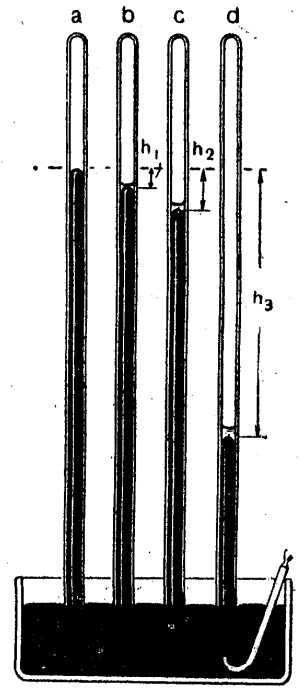


Рис. 179. Прибор для измерения давления насыщающих паров воды, спирта и эфира.

Представим себе теперь, что жидкость находится в закрытом сосуде. В таком сосуде одновременно с процессом парообразования происходит и обратный процесс — превращение пара в жидкость. Часть молекул пара, вследствие теплового движения приблизившись к поверхности жидкости, возвращается в жидкость. Однако вначале число молекул, вылетающих из жидкости, будет больше, чем число молекул, возвращающихся обратно в жидкость. Поэтому плотность пара в сосуде будет постепенно увеличиваться. С увеличением плотности пара увеличится и число молекул его, попадающих обратно в жидкость. Наконец, настанет такой момент, начиная с которого число молекул, вылетающих из жидкости в единицу времени, окажется равным числу молекул, возвращающихся обратно в жидкость. С этого момента число молекул пара над жидкостью становится постоянным. Наступает так называемое динамическое (подвижное) равновесие между паром и жидкостью. *Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется насыщающим паром.*

112. Давление насыщающего пара. В замкнутом сосуде, содержащем жидкость, между жидкостью и паром, как мы знаем, устанавливается состояние подвижного равновесия. При повышении температуры увеличивается число молекул жидкости, которые приобретают энергию, достаточную для вылета из жидкости. Скорость испарения жидкости при этом возрастает, равновесие между паром и жидкостью нарушается, и количество пара над жидкостью увеличивается. Это приводит к увеличению плотности и давления насыщающего пара.

Таким образом, ***давление насыщающего пара возрастает с увеличением его температуры.***

Давление насыщающих паров данных жидкостей при одинаковой температуре зависит от рода этих жидкостей. Эту зависимость можно показать на следующем опыте. В сосуд с ртутью опускают несколько барометрических трубок, наполненных ртутью (рис. 179). Трубка *a* служит барометром. В трубку *b* вводят пипеткой воду, часть которой быстро испаряется в «торричеллиевой пустоте», а часть остаётся в виде жидкости над ртутью (признак того, что над ртутью находится насыщающий водяной пар). В трубку *c* вводят спирт и в трубку *d* — эфир. Так как давление насыщающего пара ртути в «торричеллиевой пустоте» ничтожно, то разность между высотами ртути в барометре и в каждой из остальных трёх трубок покажет давление насыщающего пара данной жидкости.

Наибольшим давлением, как показывает опыт, обладают пары эфира, меньшим — пары спирта и ещё меньшим — пары воды. При температуре 20° С упругость насыщающих паров этих веществ выражается следующими цифрами (в *мм рт. ст.*):

Вода . . . . . $h_1 = 17{,}5$
Спирт . . . . . $h_2 = 44{,}5$
Эфир . . . . . $h_3 = 437$

113. Независимость давления и плотности насыщающего пара от его объёма. Нальём в глубокий сосуд *A* ртути и опустим в него длинную наполненную ртутью трубку *B*. На рисунке 180 изображена верхняя часть этого прибора в трёх положениях.

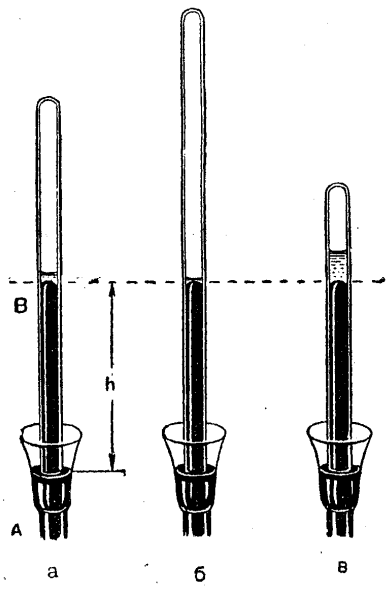


Рис. 180. В трёх разных положениях трубки ртуть остаётся на одном уровне.

Введём внутрь трубки *B* столько эфира, чтобы часть его при этом испарилась, а часть осталась на поверхности ртути в виде жидкости. В пространстве над жидким эфиром находятся насыщающие пары, давление которых равно $H - h$, где H — давление атмосферы, а h — высота столба ртути в трубке [1]. Температура прибора во всё время опыта поддерживается постоянной.

Поднимем теперь трубку *B* вверх. Этим мы увеличим объём, занимаемый паром. Плотность пара в первый момент уменьшится. Но при этом сейчас же нарушится подвижное равновесие между паром и жидкостью. Число молекул пара, возвращающихся в жидкость, окажется меньше числа мо-

[1] Весом столбика жидкого эфира можно пренебречь, так как он очень мал по сравнению с весом столба ртути.

лекул, вылетающих из жидкости. Жидкость будет испаряться до тех пор, пока плотность пара не достигнет прежней величины. Высота столба ртути остаётся прежней; следовательно, давление паров эфира при увеличении его объёма не изменяется, количество же жидкого эфира над ртутью уменьшается (рис. 180, *б*).

Погрузим теперь трубку в глубь сосуда; этим мы уменьшим объём, занимаемый паром, вследствие чего в первый момент увеличится его плотность и столбик ртути слегка опустится. Подвижное равновесие пара и жидкости при этом нарушится, в результате чего часть пара перейдёт в жидкость. Столбик жидкого эфира над ртутью увеличится, высота же столба ртути окажется опять прежней, т. е. давление паров эфира не изменится (рис. 180, *в*).

Плотность и давление насыщающего пара в присутствии жидкости не изменяются ни при уменьшении, ни при увеличении объёма, занимаемого насыщающим паром; если только температура жидкости и пара остаётся постоянной.

Давление насыщающего пара данной жидкости при данной температуре есть величина постоянная; она изменяется только с изменением температуры.

114. Ненасыщающий пар. Если в пространстве, содержащем пары какой-нибудь жидкости, может происходить дальнейшее испарение этой жидкости, то пар, находящийся в этом пространстве, называется ненасыщающим паром.

Изменяя объём ненасыщающего пара, мы заметим, что давление его также изменяется: при уменьшении объёма давление увеличивается, а при увеличении объёма давление уменьшается.

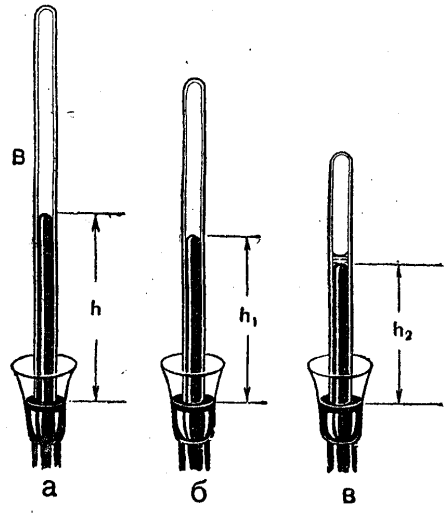


Рис. 181. Демонстрация перехода ненасыщающего пара в насыщающий.

Пусть трубка *B* поднята так высоко, что в ней находится ненасыщающий пар (рис. 181, *а*). Давление этого пара равно $H - h$, где H — атмосферное давление. Если после этого опускать трубку, то уровень ртути в ней будет понижаться: $h_1 < h$ (рис. 181, *б*), а это показывает, что давление пара возрастает ($H - h_1 > H - h$). Давление пара будет возрастать до тех пор, пока пар не станет насыщающим. Над ртутью при этом появится жидкость (рис. 181, *в*). С момента насыщения пара его давление станет постоянным и равным $H - h_2$. Это будет наибольшее давление пара при данной температуре.

Наибольшее давление при данной температуре пар производит в состоянии насыщения.

Опуская далее трубку *B*, мы в конце концов получим над ртутью жидкость, объём которой даже при очень больших давлениях уменьшается весьма незначительно.

Графически переход ненасыщающего пара в жидкость путём уменьшения его объёма без изменения температуры представляется кривой *ABCD* (рис. 182). Часть *AB* этой кривой соответствует ненасыщающему пару, точка *B* — состоянию насыщения, линия *BC* — конденсации пара и *CD* — жидкости. Кривая *ABCD* называется изотермой пара и жидкости.

Ненасыщающий пар можно привести в состояние насыщения не только путём уменьшения объёма, но и путём понижения его температуры. Так, если полить эфиром наружную часть трубки *B* (рис. 181, *а*), то эфир, испаряясь, охладит её, вследствие чего ненасыщающий пар перейдёт в состояние насыщения, частично обратившись при этом в жидкость.

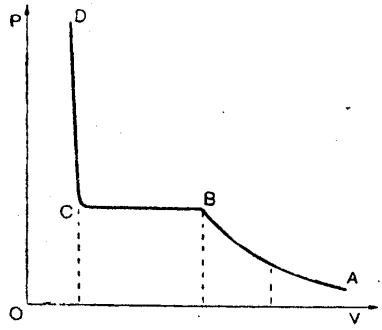


Рис. 182. График превращения ненасыщающего пара в жидкость.

Этим свойством пара объясняется запотевание холодных предметов, внесённых в тёплую комнату, образование тумана, росы и т. д. Таким образом, переход пара из ненасыщенного состояния в насыщенное достигается двумя путями: 1) понижением температуры и 2) повышением давления (уменьшением объёма).

Обратно переход из насыщенного в ненасыщенное состояние достигается: 1) без изменения температуры уменьшением давления (увеличением объёма) и 2) повышением температуры пара.

Если осторожно нагревать трубку, содержащую насыщающий пар (рис. 180), то жидкость, находящаяся над ртутью, постепенно испарится, и при дальнейшем нагревании над ртутью будет уже ненасыщающий пар.

В технике ненасыщающий пар, получаемый путём перегрева насыщающего пара, называется перегретым паром. Для работы паровых двигателей в настоящее время применяют исключительно перегретый пар, имеющий температуру от 150 до 600°С.

115. Кипение. Будем нагревать воду в колбе, следя за её температурой и происходящими в ней явлениями.

Прежде всего замечаем появление внутри жидкости небольших пузырьков газа. Появление этих пузырьков объясняется выделением воздуха, абсорбированного (поглощённого) стенками сосуда и водой. Так как внутрь каждого пузырька происходит испарение воды, то, кроме воздуха, пузырьки содержат насыщающие пары воды.

При дальнейшем нагревании воды пузырьки воздуха с паром увеличиваются в размере и становятся многочисленнее. На рисунке 183 изображены последовательные стадии роста одного из пузырьков. Достигнув определённой величины (рис. 183, *а*), пузырёк отрывается (рис. 183, *б*) от стенок сосуда.

Поднимающиеся пузырьки, попадая в верхние, более холодные слои воды, уменьшаются в размерах, так как содержащиеся в них пары конденсируются и остаётся лишь очень малое количество воздуха, который и выходит на поверхность (рис. 183, *в*).

Когда вся жидкость достаточно прогрелась, пузырьки уже не пропадают в верхних слоях, но, поднимаясь, продолжают расти и лопаются на поверхности жидкости, выбрасывая содержащийся в них пар (рис. 183, *г*). *Парообразование, происходящее одновременно внутри и с поверхности жидкости, называется кипением.*

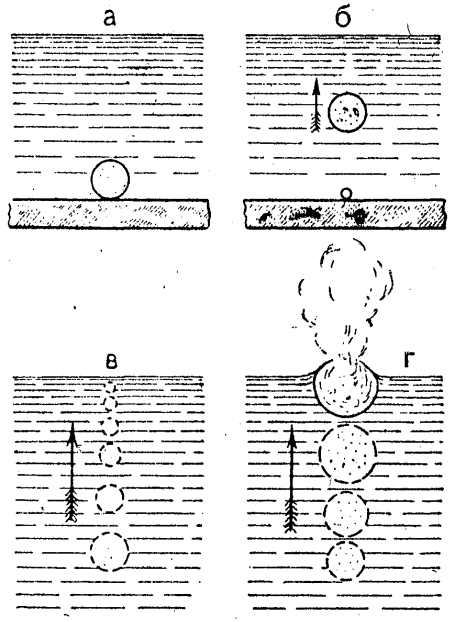


Рис. 183: *а* — рост пузырька воздуха вследствие испарения в него жидкости; *б* — отрыв пузырька и зародыш следующего; *в* — поднятие пузырька; *г* — кипение жидкости.

Очевидно, что при кипении давление насыщающего пара внутри пузырьков таково, что оно способно преодолеть внешнее атмосферное давление, и пар из пузырьков вырывается наружу. Это значит, что ***кипение происходит при такой температуре, при которой давление насыщающих паров жидкости равно наружному давлению на свободную поверхность жидкости.***

Отсюда следует, что при уменьшении давления на жидкость температура её кипения должна понижаться, а при увеличении давления — повышаться. Опыт подтверждает это заключение.

Поместим под колокол воздушного насоса стакан с холодной водой. Мы заметим, что при достижении в колоколе определённого разрежения холодная вода бурно закипает.

Если поставить под колокол насоса часовое стёклышко с каплей воды и разредить воздух в колоколе, то вода сначала закипит, а затем замёрзнет. Почему? Дело в том, что при испарении и кипении уменьшается внутренняя энергия воды; вследствие этого температура капли воды понижается до 0° С и она замерзает.

Как известно, давление воздуха уменьшается с увеличением высоты над уровнем моря. Следовательно, с поднятием вверх температура кипения жидкости должна уменьшаться. Это подтверждается опытом. На рисунке 184 графически показано изменение температуры кипения воды в зависимости от высоты над уровнем моря.

Температура кипения зависит от рода жидкости. Например, при атмосферном давлении ртуть кипит при 357° С, керосин — при 170—260° С (в зависимости от сорта), спирт — при 78° С, эфир — при 35° С, жидкий аммиак — при — 33,4° С.

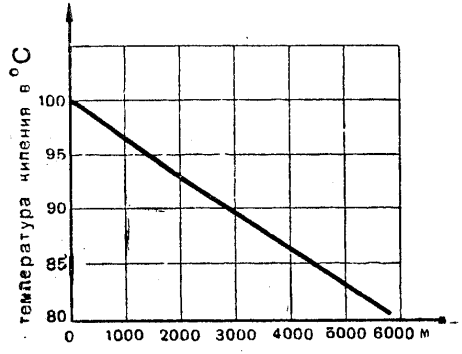


Рис. 184. График понижения температуры кипения воды с увеличением высоты над уровнем моря.

Температура кипения данной жидкости зависит не только от внешнего давления, но и от тех примесей, которые находятся в ней.

Как правило, наличие в жидкости растворённого твёрдого вещества повышает температуру её кипения. Так, вода, содержащая 12% поваренной соли, кипит при 102°С. Если же повысить концентрацию раствора примерно до 40%, то температура кипения возрастёт до 108° С.

116. Удельная теплота парообразования. ***Количество теплоты, необходимое для превращения единицы массы жидкости при температуре кипения в пар, называется удельной теплотой парообразования.***

Удельная теплота парообразования выражается в $\frac{кал}{г}$ и $\frac{ккал}{кг}$, а в системе единиц СИ — в $\frac{дж}{кг}$. В этой системе удельная теплота парообразования воды $L = 539 \cdot 4186{,}8 \frac{дж}{кг} \approx 2258 \cdot 10^3 \frac{дж}{кг}$.

В следующей таблице указаны величины удельной теплоты парообразования для некоторых жидкостей при температуре кипения этих жидкостей под атмосферным давлением:

Вещество	Удельная теплота парообразования, $\frac{кал}{г}$	Вещество	Удельная теплота парообразования, $\frac{кал}{г}$
Вода	539	Эфир	84
Аммиак	327	Сероуглерод . . .	84
Спирт	204	Скипидар	70
Бензин	95	Ртуть	69

Для одной и той же жидкости удельная теплота парообразования при разных температурах имеет разное значение. Это видно из следующей таблицы для воды:

Температура, °С	0	50	100	150	200	250	300	350	374
Удельная теплота парообразования, $\frac{кал}{г}$ . . .	595	568	539	506	468	408	330	210	0

Из таблицы видно, что удельная теплота парообразования уменьшается с повышением температуры жидкости.

Теплота парообразования выделяется, когда пар конденсируется в жидкость. На этом основано опытное определение удельной теплоты парообразования. Установка для такого опыта изображена на рисунке 185.

Пар из колбы *A* через пробирку *B* поступает в калориметр *C* с водой, где конденсируется, нагревая при этом воду. Обозначим

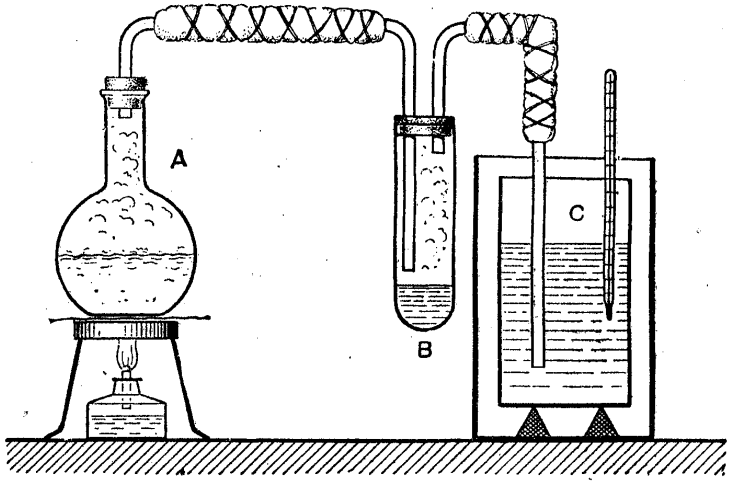


Рис. 185. Установка для определения удельной теплоты парообразования воды.

массу воды в калориметре до впускания в неё пара через m, массу калориметра с мешалкой m_1, удельную теплоёмкость воды c, удельную теплоёмкость калориметра c_1, начальную температуру воды и калориметра t_1, массу пропущенного в воду калориметра пара m_2 (находится по разности массы воды в калориметре до и после пропускания в неё пара), температуру кипения воды t_2, окончательную температуру воды в калориметре θ, искомую удельную теплоту парообразования воды L.

Количество теплоты, полученное водой и калориметром при пропускании пара:

$$Q = cm(\theta - t_1) + c_1 m_1 (\theta - t_1). \quad (1)$$

Количество теплоты, отданное паром при конденсации его в жидкость, равно Lm_2. При дальнейшем охлаждении получившейся жидкости от температуры конденсации до окончательной температуры выделится количество теплоты: $cm_2(t_2 - \theta)$.

Всего выделяется теплоты:

$$Q = Lm_2 + cm_2 (t_2 - \theta). \quad (2)$$

Приравнивая правые части равенства (1) и (2), составляем уравнение теплового баланса:

$$cm(\theta - t_1) + c_1 m_1 (\theta - t_1) = Lm_2 + cm_2 (t_2 - \theta).$$

Отсюда получаем формулу для вычисления величины L:

$$L = \frac{1}{m_2} [cm(\theta - t_1) + c_1 m_1 (\theta - t_1) - cm_2 (t_2 - \theta)].$$

Упражнение 31.

1. Определить количество теплоты, требующееся для превращения 1 *кг* воды, взятой при 0° С, в пар при 100° С.
2. Сколько теплоты выделится при конденсации 100 *г* водяного пара, имеющего температуру 100° С, и при охлаждении полученной воды до 20° С?
3. Удельная теплота парообразования воды больше, чем эфира. Почему же эфир, если им смочить руку, сильнее охлаждает её, чем вода в таких случаях?
4. В сосуд, содержащий 30 *кг* воды при 0° С, вводят 1,85 *кг* водяного пара, имеющего температуру 100° С, вследствие чего температура воды становится равной 37° С. Найти удельную теплоту парообразования воды.
5. Какое количество теплоты необходимо, чтобы превратить 1 *кг* льда при 0° С в пар при 100° С?
6. Какое количество теплоты необходимо для того, чтобы 5 *кг* льда при — 10° С обратить в пар при 100° С и затем нагреть пар до 150° С при нормальном давлении? Удельная теплоёмкость водяного пара при постоянном давлении равна 0,49 $\frac{кал}{г \cdot град}$, или 2051,5 $\frac{дж}{кг \cdot град}$.
7. Сколько килограммов каменного угля надо сжечь для того, чтобы превратить в пар 100 *кг* льда, взятого при 0° С? Коэффициент полезного действия топки 70%. Теплота сгорания угля 7000 $\frac{ккал}{кг}$, или $29{,}3 \cdot 10^6 \frac{дж}{кг}$.

117. Влажность воздуха. Окружающий нас атмосферный воздух вследствие непрерывного испарения воды с поверхности водоёмов и растительных покровов всегда содержит в себе водяные пары. Чем больше водяных паров находится в определённом объёме воздуха, тем ближе пар к состоянию насыщения. С другой стороны, чем выше температура воздуха, тем большее количество водяных паров потребуется для его насыщения.

В зависимости от количества паров, находящихся при данной температуре в атмосфере, воздух бывает различной степени влажности. Определение влажности имеет огромное значение при исследовании различных явлений в атмосфере, для некоторых видов производства, соблюдения гигиены и т. д.

Количество водяного пара (в граммах), содержащегося в 1 м³ воздуха, называется абсолютной влажностью воздуха[1].

Зная абсолютную влажность воздуха, мы ещё не можем определить, насколько сух или влажен воздух. Необходимо при этом учитывать и температуру воздуха. Если температура низка, то данное количество водяного пара в воздухе может оказаться очень близким к насыщению, т. е. воздух будет сырым. При более высокой температуре то же количество водяного пара далеко от насыщения, воздух — сухой.

Для суждения о степени влажности воздуха важно знать, близок или далёк водяной пар, находящийся в воздухе, от состояния насыщения. Для этого вводят понятие относительной влажности.

Относительной влажностью воздуха называется отношение абсолютной влажности к тому количеству пара, которое необходимо для насыщения 1 м³ воздуха при данной температуре.

Молекулы водяного пара ведут себя так же, как молекулы газа, поэтому для пара имеет место та же зависимость между плотностью и давлением, какая установлена для газа в § 85. На этом основании мы можем определить относительную влажность как *отношение давления водяного пара, содержащегося в воздухе, к давлению водяного пара, насыщающего воздух при той же температуре.*

Если D_0 — количество пара, нужное для насыщения воздуха, D — фактическое количество пара в воздухе, то относительная влажность f при данной температуре будет равна:

$$f = \frac{D}{D_0}.$$

Таким образом, чтобы определить относительную влажность воздуха, надо абсолютную влажность разделить на количество пара, необходимое для насыщения 1 $м^3$ воздуха при данной температуре.

Так как величина D_0 — наибольшая при данной температуре, то относительная влажность — всегда правильная дробь. Её обычно выражают в процентах:

$$f = \frac{D}{D_0} \cdot 100\%.$$

---

[1] В метеорологии принято называть абсолютной влажностью давление водяного пара, содержащегося в воздухе, измеренное в миллиметрах ртутного столба.

Нормальной влажностью жилых помещений считают 60—70%.

118. Способы определения влажности воздуха. Если влажный воздух охлаждать, то при некоторой температуре в нём окажется насыщающий водяной пар, который при дальнейшем охлаждении начнёт конденсироваться в виде росы.

Температура, при которой водяные пары в воздухе становятся насыщающими, называется точкой росы.

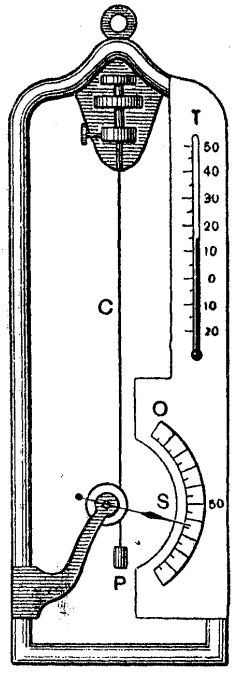


Рис. 186. Волосной гигрометр.

Зная температуру воздуха и определив точку росы, легко рассчитать его влажность.

Например, если точка росы 8° С, а температура воздуха 15° С, то, пользуясь специальной таблицей (она имеется в задачниках и справочниках), найдём количество насыщающего водяного пара в 1 $м^3$ воздуха при 8° С; оно равно 8,3 $\frac{г}{м^3}$, это и будет абсолютная влажность воздуха. Определив по той же таблице количество насыщающего пара при 15° С (оно равно 12,8 $\frac{г}{м^3}$) и разделив на это количество абсолютную влажность, получим относительную влажность воздуха. В данном случае:

$$f = \frac{8{,}3}{12{,}8} \cdot 100 \approx 64\%.$$

119. Волосной гигрометр. Приборы, служащие для определения влажности воздуха, называют гигрометрами. Конструкции их могут быть различными.

На рисунке 186 изображена схема устройства волосного гигрометра. Обезжиренный человеческий волос изменяет свою длину при изменении влажности: удлиняется при увеличении влажности и укорачивается при уменьшении.

Если такой волос *C* обернуть вокруг лёгкого блока, прикрепив один конец его к металлической рамке, а к другому подвесить груз *P*, то при изменении длины волоса указатель *S*, прикреплённый к блоку, будет двигаться.

Проградуировав предварительно прибор, мы можем по нему непосредственно определять относительную влажность.

Волосной гигрометр применяют в тех случаях, когда в определении влажности воздуха не требуется большой точности.

120. Психрометр [1] Августа. Этот прибор состоит из двух одинаковых термометров *A* и *B* (рис. 187). Шарик термометра *B* обёрнут

[1] Психрометр — от греч. слов: психриа — холод и метрео — мерю.

марлей *M*, конец которой опущен в стакан с водой *C*. Вода из стакана по марле поднимается вверх, поэтому марля всегда влажная. Другой термометр, шарик которого сух, показывает температуру воздуха. Когда воздух насыщен водяными парами, то показания обоих термометров одинаковы: оба термометра находятся в одинаковых условиях. Если же воздух не насыщен парами, то с влажного термометра испаряется вода и температура его при этом понижается. Понижение температуры происходит до тех пор, пока уменьшение внутренней энергии, обусловленное испарением воды, не уравновесится притоком энергии из окружающего пространства.

В обычных условиях, таким образом, между показаниями сухого и влажного термометров будет иметь место так называемая психрометрическая разность. Чем больше психрометрическая разность, тем, очевидно, суше воздух, и, наоборот, чем она меньше, тем больше относительная влажность воздуха.

На основании теории, которую мы здесь не рассматриваем, составляют специальные психрометрические таблицы, пользуясь которыми по показаниям сухого и влажного термометров можно быстро определить относительную влажность воздуха.

Психрометрами Августа обычно пользуются в тех случаях, когда требуется особо точное определение влажности воздуха. Большое значение имеет определение влажности воздуха в метеорологии для изучения явлений, происходящих в атмосфере, и для предсказания погоды.

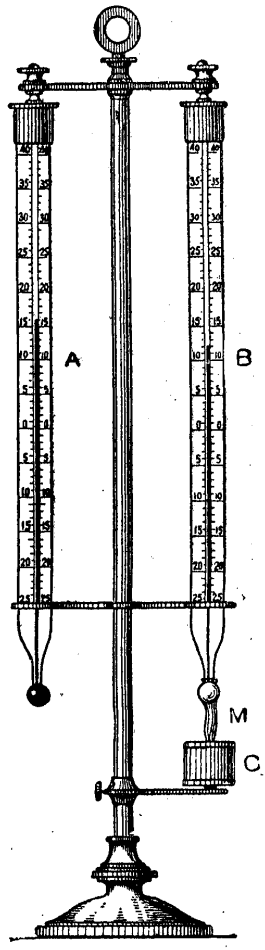


Рис. 187. Психрометр Августа.

Упражнение 32.

1. Абсолютная влажность воздуха равна 10 $\frac{г}{м^3}$. Найти относительную влажность при температуре 12, 18 и 24° С.

2. Относительная влажность в комнате $f = 60\%$, температура 16° С. До какой температуры надо охладить блестящий металлический предмет, чтобы на его поверхности появилась роса?

3. Сухой термометр показывает 20° С, а смоченный 15,5°. Найти абсолютную влажность воздуха.

4. При температуре 10° С относительная влажность воздуха равна 80%. Как изменится относительная влажность, если повысить температуру до 20° С?

5. Сосуд содержит воздух при $t = 15°$ С. Относительная влажность воздуха $f = 63\%$. Когда воздух был осушен хлористым кальцием, вес сосуда уменьшился на 3,243 *г*. Определить объём сосуда.

121. Критическая температура. Уже давно возникла мысль, что, увеличивая давление и одновременно понижая температуру, можно довести обычные газы, так же как и ненасыщающие пары, до состояния насыщения и обратить их затем в жидкость. Таким способом английский учёный Фарадей обратил в жидкость ряд газов: аммиак, углекислый газ, хлор и др. Но такие газы, как кислород, азот, водород, окись углерода, окись азота и метан, не обращались в жидкость даже при сжатии до 3000 *am* и при охлаждении до —110° С. Нужно было выяснить причины этого явления.

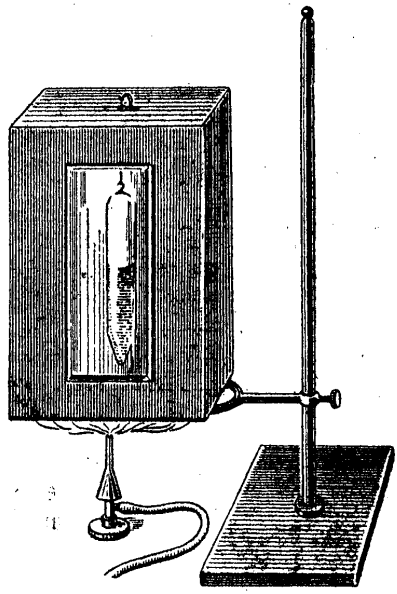


Рис. 188. Прибор для изучения критического состояния.

Проблемой сжижения газов занимался и великий русский учёный Д. И. Менделеев. В то время как его предшественники в своих рассуждениях о сжижении газов исходили из подобия этого процесса процессу превращения ненасыщающего пара в жидкость, Менделеев обратил внимание на условия обратного процесса — перехода жидкости в пар.

Изучив эти условия, Менделеев пришёл к выводу о существовании для каждого вещества такой температуры, выше которой вещество находится в газообразном состоянии. Эту температуру Менделеев назвал температурой абсолютного кипения. Впоследствии она стала называться критической температурой.

Что это за температура? Чтобы ответить на этот вопрос, проделаем следующий опыт.

Поместим в воздушную ванну запаянную трубку, часть объёма которой занята жидкостью, остальная часть — насыщающим паром (рис. 188), и будем её нагревать. При нагревании плотность жидкости и плотность пара в трубке будут изменяться.

В качестве примера построим графики изменения плотности воды и водяного пара от температуры. Для этого по оси абсцисс будем откладывать температуру, а по оси ординат — плотности жидкости и пара (рис. 189, *а*).

Так как жидкость при нагревании расширяется, то кривая *CD*, показывающая плотность жидкости в зависимости от температуры, опускается, указывая на уменьшение плотности жидкости по мере повышения температуры.

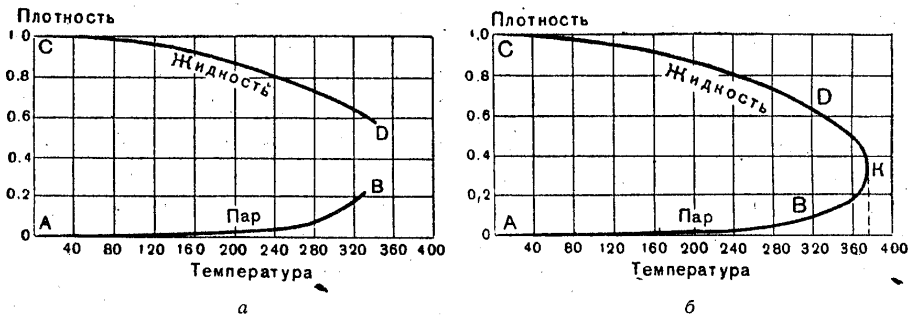


Рис. 189. График изменения плотности воды и пара при нагревании.

А так как при повышении температуры жидкость испаряется, то плотность пара возрастает. Это возрастание плотности пара на графике изображено кривой линией *AB*.

Кривая *AB* расположена ниже кривой *CD*, так как при всякой температуре плотность пара в присутствии жидкости меньше плотности жидкости.

По мере повышения температуры плотность жидкости уменьшается, а плотность пара увеличивается. Кривая *CD* будет опускаться вниз, а кривая *AB* подниматься вверх. Обе кривые сливаются в некоторой точке *K* (рис. 189, *б*), которая называется критической точкой, а температура, при которой происходит слияние кривых, называется критической температурой. Критической точке *K* соответствует особое состояние вещества, называемое критическим, при котором исчезает всякое различие между жидкостью и её насыщающим паром.

Давление и удельный объём вещества (объём единицы массы) в критическом состоянии называются также критическими.

Первые систематические работы по определению критических температур различных веществ были проведены русскими учёными М. П. Авенариусом, А. И. Надеждиным и другими.

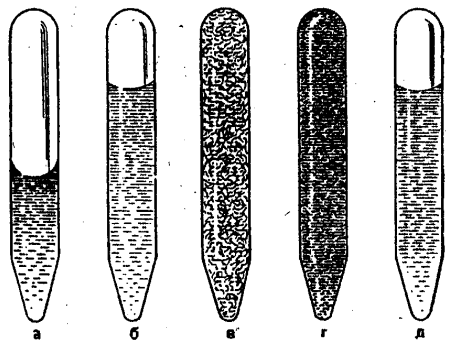


Рис. 190. К опыту с критическим состоянием эфира.

Критическое состояние эфира Авенариус изучал на приборе, изображённом на рисунке 188. В трубочке, помещённой в воздушную ванну, эфир находится частью в жидком, частью в парообразном состоянии. При комнатной температуре оба эти состояния резко разграничены вогнутым мениском жидкости (эфир смачивает стекло) (рис. 190, *а*). При нагревании трубочки вогнутая граница раздела постепенно выпрямляется (рис. 190, *б*) и

сразу исчезает при критической температуре эфира, равной 194° С. Выше этой температуры эфир в трубочке находится в газообразном состоянии (рис. 190, *в*). Постепенно охлаждая после этого трубочку, можно наблюдать критическое состояние эфира (рис. 190, *г*) (содержимое в трубочке потемнеет), а за ним и появление границы, разделяющей жидкость и пар (рис. 190, *д*).

В следующей таблице приведены критические температуры и критические давления некоторых веществ:

Вещество	Критическая температура, °С	Критическое давление, *am*
Вода	374	218
Спирт	243	63
Эфир	194	35
Углекислый газ	31	73
Кислород	—119	50
Азот	—147	33,5
Водород	—240	12,8
Гелий	—268	2,25

122. Сжижение газов. С открытием наличия у каждого вещества критической температуры стало совершенно ясным, почему долгое время не удавалось перевести в жидкое состояние некоторые газы: критическая температура этих газов очень низка. Чтобы обратить эти газы в жидкость, необходимо было прежде всего охладить их ниже критической температуры.

В 1883 г. был обращён в жидкость водород при температуре —244° С. В 1910 г. голландский учёный Камерлинг-Оннес получил жидкий гелий, температура кипения которого равна —269° С.

Охлаждая сжиженные газы путём быстрого испарения, получили их в твёрдом состоянии. В 1913 г. Камерлинг-Оннес получил твёрдый водород; его температура плавления оказалась равной —257,1° С. При температуре —271,9° С и давлении 26 *am* был получен в твёрдом состоянии гелий.

Таким образом, в настоящее время все известные на Земле вещества получены в жидком и твёрдом состояниях.

Приведём таблицу температур (в градусах) кипения и отвердевания некоторых веществ при нормальном давлении:

Вещество / Температура	Хлор	Кислород	Азот	Водород	Гелий
Температура кипения	—33,8	—183	—195	—253	—269
Температура отвердевания	—102	—219	—210	—257	—271,9 (26 *am*)

Воздух в жидком состоянии легко разделить на составляющие его газы. При испарении жидкого воздуха сначала испаряются газы, имеющие более низкую температуру кипения: неон, азот, а затем аргон, кислород и др. Полученные таким путём газы широко применяют в технике. Кислород, например, в смеси с ацетиленом (или водородом) применяют для сварки и резки металлов.

Кислород используют также для дутья в доменных процессах. Аргон и неон идут для наполнения электрических ламп; азот — для получения аммиака и т. д. Вот почему важно промышленное получение жидкого воздуха.

Устройство промышленных машин для получения жидкого воздуха основано на охлаждении воздуха при быстром его расширении. Схема устройства машины для получения жидкого воздуха изображена на рисунке 191. Воздух засасывается снаружи в компрессор *A* и сжимается в нём поршнем до давления в несколько десятков атмосфер.

В змеевике *C* сжатый компрессором воздух охлаждается водой; далее он поступает в расширитель (детандер) *B*, где, расширяясь и совершая при этом работу, охлаждается до температуры ниже критической. При обратном ходе поршня детандера воздух конденсируется в жидкость, собирающуюся в сосуд *D*.

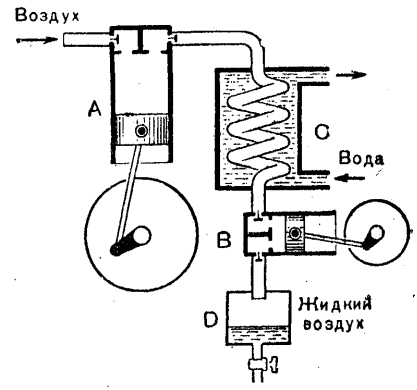


Рис. 191. Схема устройства машины для получения жидкого воздуха.

Советский учёный П. Л. К а п и ц а вместо цилиндра с поступательно-возвратным движением поршня применил вращающуюся сжатым воздухом турбину (турбодетандер). Эта установка оказалась во много раз производительнее и экономичнее, чем машины других систем.

Применяя в машинах в качестве охладителя кипящий жидкий воздух, получают жидкий водород. Он представляет собой самую лёгкую жидкость, её плотность 0,07 $\frac{г}{см^3}$. Испаряя жидкий водород под пониженным давлением, можно ещё больше понизить температуру; при температуре —257° С водород обращается в твёрдое состояние, его плотность в этом состоянии 0,08 $\frac{г}{см^3}$. При температуре твёрдого водорода все вещества, за исключением гелия, находятся в жидком и твёрдом состояниях. После многих попыток удалось наконец обратить в жидкость и гелий. Для этого пришлось гелий предварительно охладить кипящим жидким водородом.

123. Свойства сжиженных газов. Сжиженные газы быстро испаряются. Для их сохранения Дьюар сконструировал специальные стеклянные сосуды с двойными стенками, из внутреннего пространства между которыми выкачан воздух. Таким путём почти устраняется теплообмен содержимого сосудов с внешней средой через конвекцию и теплопроводность. Для уменьшения нагревания излучением стенки делаются зеркальными. Один из типов сосуда Дьюара можно видеть в термосе, служащем для сохранения пищи в горячем виде.

При температуре сжиженных газов различные вещества переходят в твёрдое состояние. Так, обливая жидким воздухом ртуть, налитую в специальную форму, можно получить блестящий ртутный молоточек, которым легко вбить в доску небольшой гвоздь. Погрузив в бокал с жидким воздухом пробирку со спиртом, мы получим твёрдый спирт, температура замерзания которого —114° С.

Физические свойства многих веществ при температуре сжиженных газов значительно изменяются. Например, ртуть и цинк делаются ковкими, свинец — пластичный металл — делается упругим, как сталь; колокольчик, сделанный из свинца, издаёт звон. Некоторые тела, упругие при обычной температуре, будучи охлаждены в сжиженном газе, становятся хрупкими, как стекло. Так, кусок резины после охлаждения в жидком воздухе легко ломается, а резиновый мячик при ударе разбивается вдребезги. При температурах, близких к абсолютному нулю, у многих веществ сопротивление электрическому току падает до нуля. Это явление получило в науке название *сверхпроводимости*.

Благодаря обильному содержанию кислорода жидкий воздух сильно способствует горению. Кусок ваты, смоченный жидким воздухом, вспыхивает, как порох. Угольный порошок, пропитанный жидким воздухом, представляет вещество, по взрывной силе не уступающее динамиту.

ГЛАВА XII

ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

124. Работа при расширении газа. Рассмотрим, как в простейшем случае подсчитать работу, совершаемую газом при расширении.

Представим себе, что в цилиндре под поршнем, площадь которого S, находится какой-нибудь газ, давление которого равно p (рис. 192, *а*). Сила, с которой газ давит на поршень, определяется по формуле $F = pS$. Если нагревать газ при постоянном давлении, то он расширится и поршень переместится на некоторое расстояние h.

Газ при этом совершит работу $A = pSh$. Но $Sh = V_2 - V_1$ есть увеличение объёма газа, следовательно,

$$A = p(V_2 - V_1).$$

Работа газа при изобарном расширении равна произведению давления газа на увеличение его объёма.

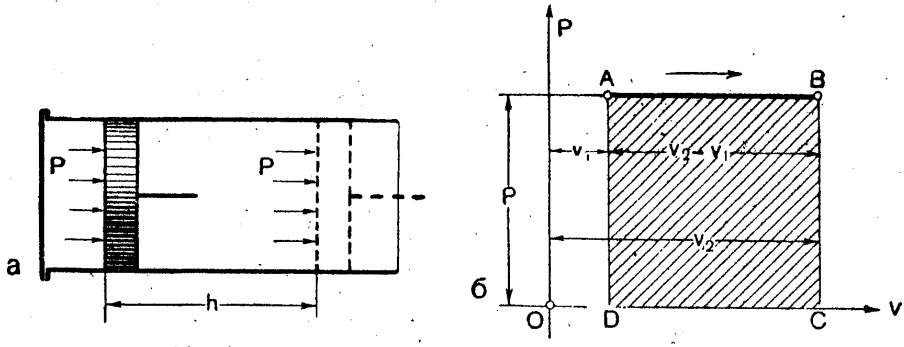


Рис. 192. К расчёту работы при изобарном расширении газа.

Графически работа, произведённая газом при изобарном расширении, изобразится площадью прямоугольника $ABCD$, основание которого равно $V_2 - V_1$, а высота p (рис. 192, *б*).

125. Тепловой двигатель. Условия, необходимые для работы теплового двигателя. *Тепловым двигателем называется машина, в которой происходит превращение энергии, полученной при сгорании топлива, в механическую энергию.*

Вещество, производящее работу в тепловых двигателях, называется рабочим телом или рабочим веществом. В паровых двигателях таким рабочим веществом является пар, а в двигателях внутреннего сгорания — газ.

Как устроены двигатели внутреннего сгорания и паровые двигатели, мы рассмотрим дальше, а сейчас установим общие условия (относящиеся ко всем тепловым двигателям), которые необходимы, чтобы преобразовать энергию топлива в энергию движения машин и механизмов. Эти условия мы выясним на примере работы паросиловой установки, схема которой изображена на рисунке 193.

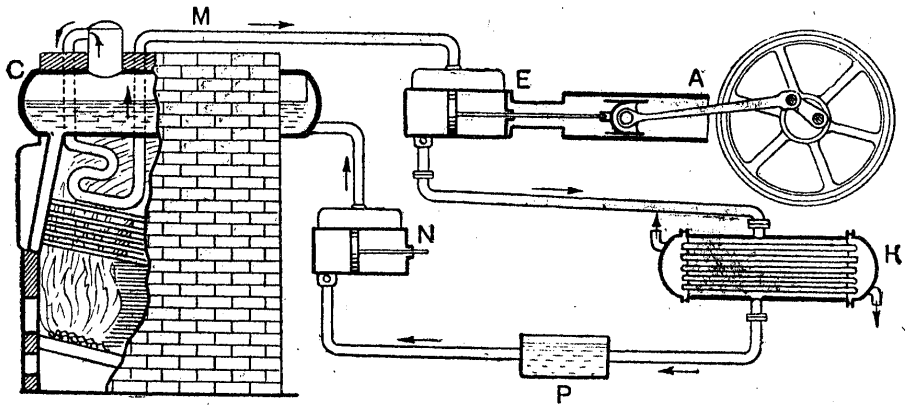


Рис. 193. Схема паросиловой установки.

Одна из частей паросиловой установки — топка с паровым котлом *C* (об устройстве котлов см. § 128). В котле образуется пар, который под давлением направляется по трубе *M* в цилиндр паровой машины *E*. Здесь пар расширяется и, двигая поршень, совершает работу. Посредством передающего механизма *A* возвратно-поступательное движение поршня преобразуется во вращательное движение маховика, который приводит в движение рабочие части станков, сельскохозяйственных машин, генераторов тока и т. д.

Отработавший и вследствие этого охладившийся пар выталкивается в особое устройство *K*, называемое конденсатором, где он, проходя через трубы, охлаждаемые проточной водой, теряет ещё часть своей внутренней энергии и превращается в воду. Эта вода идёт сначала в питательный бак *P*, где очищается, а из него насосом *N* подаётся обратно в котёл.

Итак, основные части паросиловой установки следующие: нагреватель (котёл с топкой), цилиндр с рабочим веществом (паром) и холодильник (конденсатор).

Особенность работы тепловых двигателей состоит в том, что часть энергии, которую получает рабочее вещество от нагревателя, обязательно отдаётся холодильнику (конденсатору).

Пусть рабочее тело получило от нагревателя количество теплоты Q_1 калорий. Часть этого количества теплоты в двигателе превращается в механическую энергию, а остальная часть, пусть это будет Q_2 калорий, переходит от рабочего тела к холодильнику. Этот процесс схематически изображён на рисунке 194: работа производится лишь за счёт разности энергии $Q_1 - Q_2$.

Во всяком тепловом двигателе не всё количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя, превращается в механическую энергию. Часть количества теплоты обязательно поглощается холодильником. В этом заключается важнейшая особенность работы теплового двигателя.

В § 76 было показано, что механическая энергия движущихся тел при всех превращениях полностью переходит во внутреннюю энергию тел.

Иначе обстоит дело, когда, наоборот, внутренняя энергия тела превращается в механическую энергию. Практика показала, например, что *внутренняя энергия газа или пара лишь частично превращается в энергию движения механизмов.*

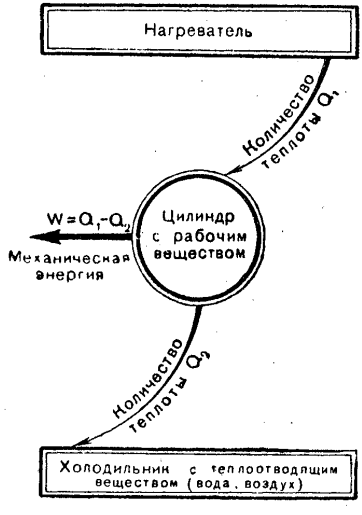


Рис. 194. Схема процесса превращения энергии в тепловом двигателе.

Причину этого нетрудно понять, если вспомнить, что внутренняя энергия тел складывается из кинетической и потенциальной энергии атомов и молекул, которые находятся в состоянии хаотического движения. Как, например, можно было бы произвести полное превращение внутренней энергии порции пара в кинетическую энергию движения поршня паровой машины? Для этого многие миллиарды беспорядочно мечущихся молекул должны были бы дружно подлететь к поршню и передать ему весь свой запас кинетической энергии.

Даже если бы такой процесс был возможен, то всё равно при этом сохранится часть внутренней энергии пара в виде потенциальной энергии взаимодействия молекул.

Итак, внутренняя энергия тел не может полностью переходить в механическую энергию движения механизмов. Этот вывод имеет огромное практическое значение, так как *он связан с проблемой повышения коэффициента полезного действия двигателей.*

126. Коэффициент полезного действия тепловых двигателей. При устройстве тепловых двигателей важно прежде всего добиться, чтобы как можно большее количество энергии сгораемого топлива превратилось в механическую энергию, иначе говоря, при минимальной затрате топлива получилась максималь-

ная работа. Тогда двигатель будет экономичным. Зная количество теплоты Q_1, переданное рабочему телу от нагревателя, и количество теплоты $Q_1 - Q_2$, превращённое в механическую энергию, можно оценить степень экономичности этого процесса превращения.

Отношение количества теплоты, превращённой машиной в механическую энергию, к количеству теплоты, полученной от нагревателя, называется коэффициентом полезного действия тепловой машины (к. п. д.).

К. п. д. машины принято обозначать буквой η (греч. «эта»):

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Изучая условия получения работы за счёт внутренней энергии пара в паровых машинах, Карно в 1924 г. установил, что коэффициент полезного действия любого реального теплового двигателя не может превышать величины $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$, где T_1 — абсолютная температура нагревателя, а T_2 — абсолютная температура холодильника. Чем ближе к. п. д. двигателя к этой величине, тем двигатель совершеннее. Этот вывод хорошо оправдывается на практике.

Отсюда следует, что для повышения коэффициента полезного действия теплового двигателя нужно увеличить температуру нагревателя и понизить температуру холодильника.

Пример. Пар входит в цилиндр паровой машины при температуре 200° С, т. е. при температуре 473° К, а уходит при температуре 100° С, или 373° К.

Коэффициент полезного действия такой машины не может быть больше величины:

$$\frac{473 - 373}{473} \cdot 100\% \approx 21\%.$$

К. п. д. тепловых двигателей вообще невысок.

127. Паровая машина. В паровой машине энергия пара непосредственно преобразуется в энергию движения поршня.

На рисунке 195 изображена схема устройства одноцилиндровой паровой машины. Пар из парового котла по трубе A поступает

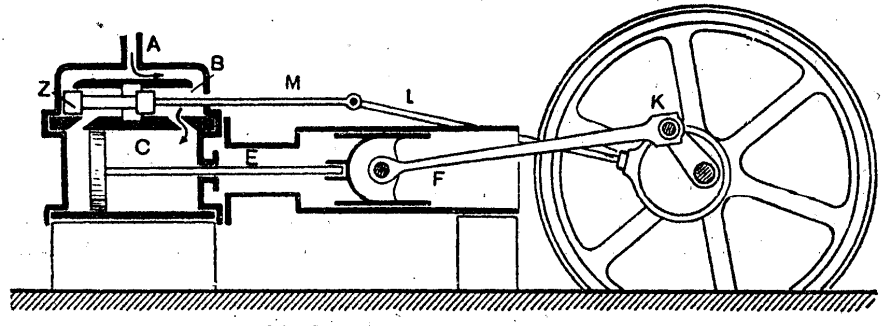


Рис. 195. Схема устройства паровой машины.

в пароораспределительную коробку B, а оттуда в рабочий цилиндр C — попеременно то с одной, то с другой стороны поршня. Распределение пара производится с помощью золотника Z [1].

Когда пар поступает в правую часть цилиндра (такой случай изображён на рис. 195), то он толкает поршень влево, а отработавший пар вытесняется и выходит через выводную трубу (на рисунке эта труба не показана). Затем, наоборот, пар поступает в левую часть цилиндра и толкает поршень вправо.

При помощи штока E, шатуна F и кривошипа K возвратно-поступательное движение поршня превращается во вращательное движение вала машины и махового колеса. В свою очередь маховое колесо через передающий механизм L и M перемещает золотник, который поочерёдно впускает пар то с правой, то с левой стороны поршня.

Диаграмма работы машины изображена на рисунке 196. Линия 0—1 изображает впуск пара при постоянном давлении; в точке 1 — отсечка пара (прекращение доступа пара в цилиндр). Затем идёт расширение по кривой 1—2. Перед началом выпуска давление пара в цилиндре измеряется ординатой точки 2, а в момент открытия выпускной трубы оно сразу падает до давления, изображаемого на чертеже ординатой точки 3. Выпуск происходит при постоянном давлении (линия 3—4). Впуском свежего пара давление в точке 4 повышается до начального.

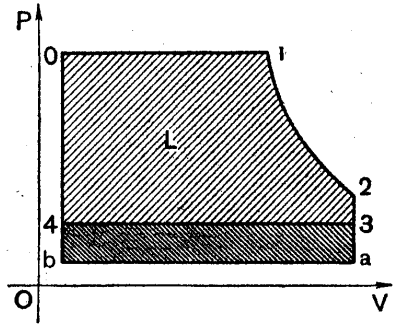


Рис. 196. Диаграмма работы паровой машины.

Величина давления при выпуске пара зависит от давления в той среде, куда выпускается пар. Если пар выпускается в воздух, то это давление, очевидно, будет близко к атмосферному.

Чем ниже давление пара при выпуске, тем большую работу совершает пар, перемещая поршень в цилиндре. Поэтому в паровых машинах часто выпуск отработавшего пара совершается не в воздух, а в конденсатор. Конденсатором называется устройство, в котором отработавший пар охлаждается, превращается в воду, а вода откачивается насосом; вследствие этого в конденсаторе поддерживается пониженное давление.

В случае работы паровой машины с конденсатором выпуск пара на диаграмме изобразится линией *ab*, лежащей ниже линии 3—4 (рис. 196). Заштрихованная площадь L изображает величину полезной работы, произведённой паром за один цикл.

Площадь 0—1—2—*ab*—0 больше, чем площадь 0—1—2—3—4—0; следовательно, машина, работающая с конденсацией пара,

[1] Имеются машины, в которых пароораспределение осуществляется не золотником, а специальными клапанами.

совершит больше полезной работы, чем машина без конденсации (при одном и том же количестве пара).

Но не только путём применения конденсаторов можно повысить к. п. д. машины. Из диаграммы (рис. 196) видно, что повышение начального давления, т. е. перемещение линии 0—1 выше, также может дать увеличение полезной работы машины. А так как для получения пара более высокого давления нужно затратить сравнительно небольшое количество дополнительной энергии, то применение пара высокого давления в паровых машинах является более выгодным.

Паровые машины сохранились в настоящее время на старых электростанциях малой мощности. Кое-где их ещё можно

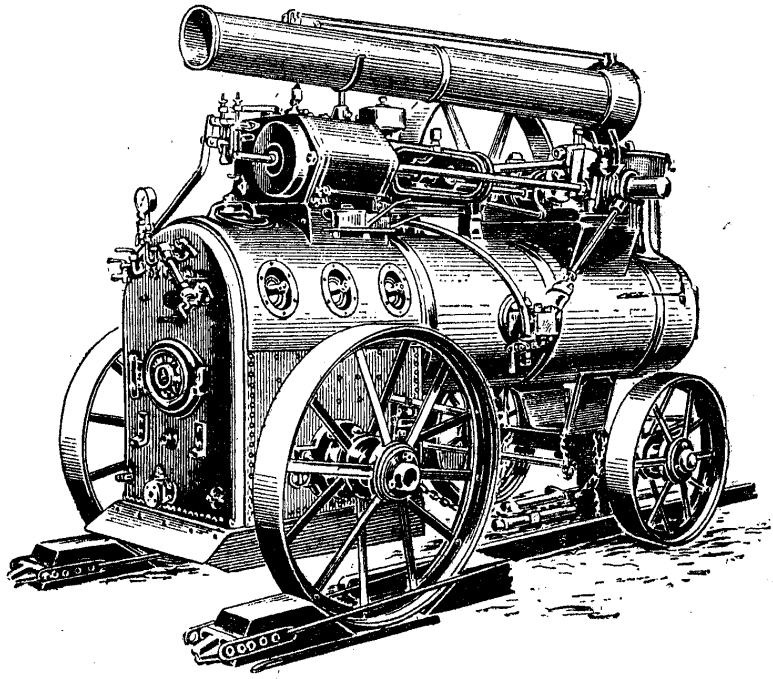


Рис. 197. Внешний вид одного из типов локомобиля.

встретить на небольших фабрично-заводских предприятиях. В сельском и лесном хозяйствах, а также на торфоразработках широко применяется особый вид паровых двигателей — локомобили. Особенность локомобиля состоит в том, что в одной установке сочетаются паровой котёл и паровая машина. На рисунке 197 показан общий вид передвижного локомобиля. В локомобиле используют местные виды топлива: торф, отходы лесного хозяйства, а в степных районах — солому.

Коэффициент полезного действия лучших современных паровых машин не выше 15%.

На рисунке 198 дана диаграмма расхода энергии в паросиловой установке. Из этой диаграммы видно, что большая часть энергии топлива — около 87% — теряется, рассеиваясь в окружающем пространстве, и лишь около 13% используется полезно.

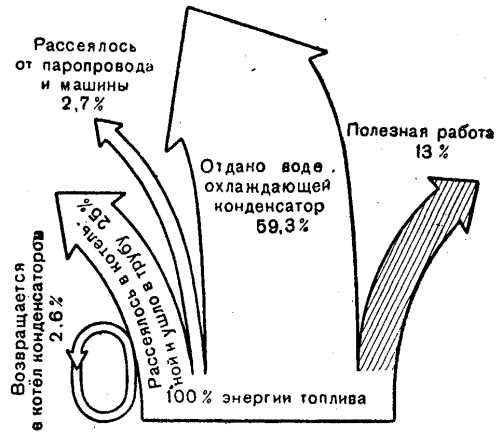


Рис. 198. Диаграмма расхода энергии в паросиловой установке.

Увеличение к. п. д. тепловых двигателей представляет собой и в настоящее время большую техническую проблему.

В современных паровых машинах увеличение к. п. д. достигается повышением давления пара и его многократным расширением, при котором пар последовательно переходит из одного цилиндра машины в другой. Отработавший пар выпускается не в атмосферу, а в конденсаторы, где он обращается в воду, возвращаемую в котёл, или, наконец, используется для отопительных целей.

128. Паровые котлы. Одна из основных частей паросиловой установки — котёл. Каждый паровой котёл состоит из топки для сжигания топлива, топочного пространства, барабана котла с водяным и паровым пространством, герметически закрытым. Всякий котёл обладает определённой производительностью, измеряемой количеством воды, которую он способен испарить в течение часа при определённых температуре и давлении. Часть котла, которая во время топки приходит в соприкосновение с пламенем, называется *поверхностью нагрева*.

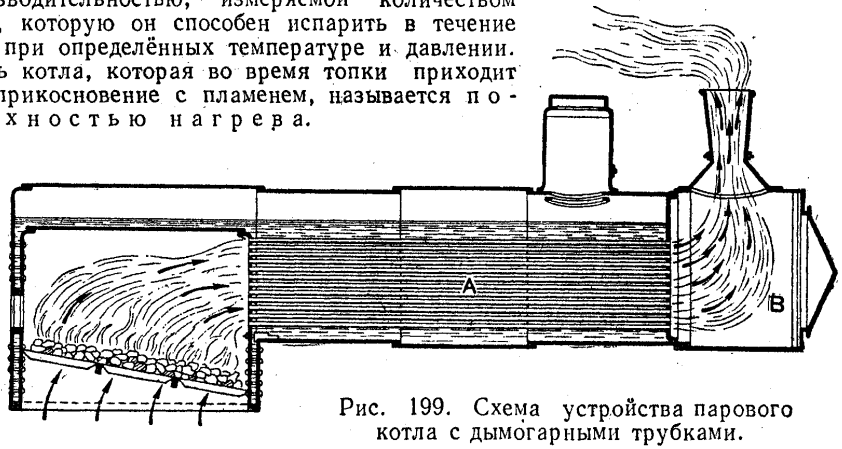


Рис. 199. Схема устройства парового котла с дымогарными трубками.

На рисунке 199 изображён *дымогарный* котёл. Внутри этого котла помещён ряд трубок *A*, по которым продукты горения проходят в дымовую коробку *B*, откуда попадают в дымовую трубу. Такие котлы устанавливают на локомобилях и на паровозах. Многочисленные дымогарные трубки дают

огромную поверхность нагрева, с помощью которой в большей степени полезно используется энергия, получающаяся при сгорании топлива. Вода в этих котлах находится между дымогарными трубками.

Можно сделать котлы иначе: по трубкам пустить воду, а между трубками пламя. Такие котлы называются водотрубными.

На рисунке 200 представлен разрез водотрубного котла. Основные части его: топка *T*, кипятильные трубы *A*, барабан *B*, сухопарник *C* и пароперегреватель *P*.

В кипятильных трубах происходит процесс парообразования. Образующийся в них пар поступает в барабан *B*, где и собирается в верхней части над водой. Из барабана пар через сухопарник *C* проходит по соединительной трубе в пароперегреватель *P*, где нагревается.

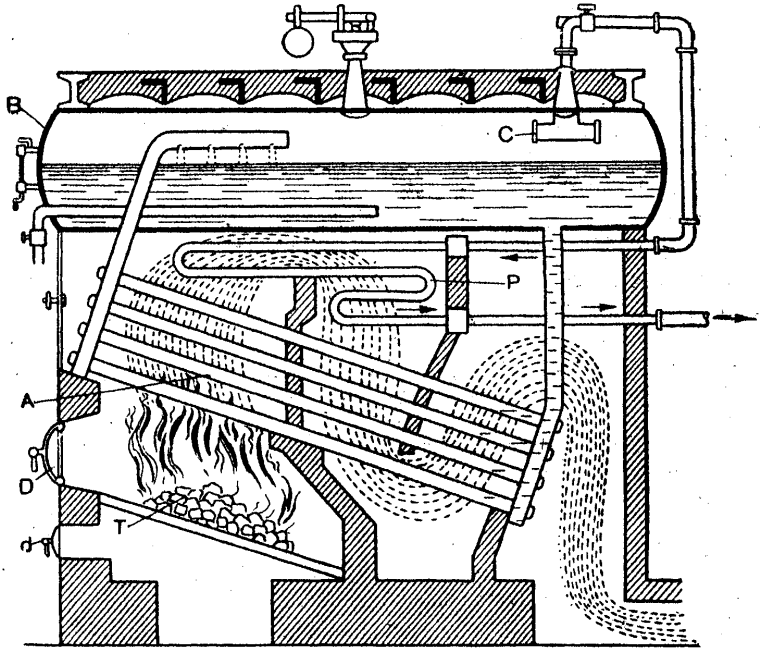


Рис. 200. Схема устройства водотрубного котла.

Топливо в этом котле забрасывается через дверцу *D*, а воздух, необходимый для горения топлива, подаётся через другую дверцу *d* в поддувало. Горячие газы поднимаются вверх и, огибая специально установленные перегородки, проходят путь, указанный на рисунке 200 пунктирными линиями.

Дальнейшим усовершенствованием в области котельной техники явилось создание А. К. Рамзиным прямоточных котлов. В этих котлах вода нагревается в длинных трубках, изготовленных в виде змеевиков. Вода подаётся в змеевики котла насосом. Проходя через змеевик, она полностью испаряется, а образовавшийся пар перегревается до требуемой температуры и, таким образом, в готовом виде выходит из змеевиков (рис. 201).

129. Паровые турбины. Среди тепловых двигателей важное место занимают паровые турбины. В отличие от поршневых паровых двигателей в паровых турбинах используется не энергия упругости пара, а кинетическая энергия струи пара.

Предположим, что давление пара в котле равно p_1. Предоставим пару возможность свободно вытекать из котла через какое-либо отверстие или через насадку — сопло (рис. 202). При истечении через сопло давление пара будет падать, и в устье сопла оно окажется равным некоторому давлению p_2. Вначале скорость пара равна нулю, при выходе же из сопла она увеличивается; при этом давление пара в сопле падает.

Потенциальная энергия пара при падении его давления уменьшается; соответственно увеличивается кинетическая энергия пара

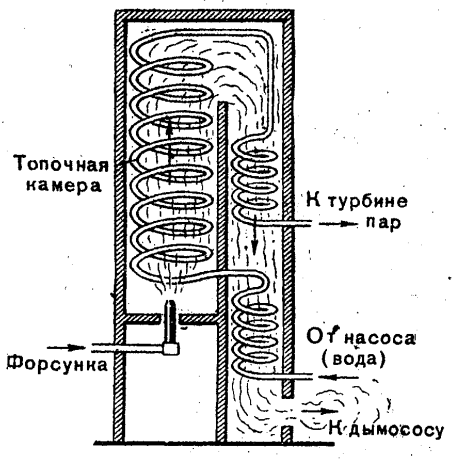


Рис. 201. Схема прямоточного котла системы проф. Рамзина.

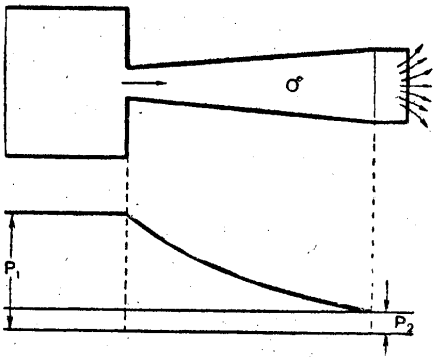


Рис. 202. Коническая насадка — сопло — паровой турбины и график изменения давления пара при прохождении через сопло.

(по закону сохранения и превращения энергии). Вытекающий из сопла пар попадает на лопатки рабочего колеса и приводит его во вращение.

Схема действия одного из типов турбин представлена на рисунке 203. На валу A насажен диск B, по ободу которого закреплены лопатки L. Против лопаток расположены сопла C, в которые пар поступает из котла. В соплах пар расширяется и, выходя из их устьев с большой скоростью, попадает в каналы, образуемые лопатками, где теряет часть своей кинетической энергии, которая идёт на приведение диска B вместе с валом во вращательное движение. На рисунке 204 изображено колесо однодисковой турбины Лаваля (без кожуха).

Турбины имеют ряд преимуществ перед паровыми машинами. Во-первых, турбины получаются при постройке более компактными, чем паровые машины той же мощности. Во-вторых, большая скорость вращения турбины позволяет на электростанциях соединять турбины с генераторами тока без всякой зубчатой передачи, так как генераторы требуют большого числа оборотов. В-третьих, в тур-

бинах нет возвратно-поступательного движения отдельных частей, которое приходилось бы преобразовывать во вращательное движение, как это делается в паровых машинах, и на что расходуется энергия.

Наконец, преимуществом турбины является чистота её конденсата (воды, полученной от охлаждённого отработавшего пара), что имеет большое значение при питании паровых котлов.

Коэффициент полезного действия турбин значительно выше, чем у паровых машин. В турбинах большой мощности он достигает 25%.

Советская техника имеет большие достижения в конструировании и строительстве паровых турбин.

Ленинградский металлический завод уже в 1930 г. стал выпускать турбины мощностью в 25 и 50 тыс. *квт* с давлением пара 28 и 29 *ат* при температуре 375 и 400° С. В послед-

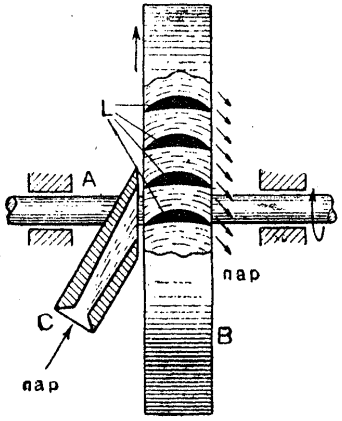


Рис. 203. Схема действия паровой турбины.

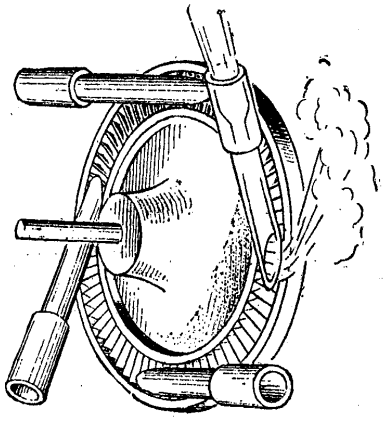


Рис. 204. Внешний вид колеса паровой турбины.

нее время этот завод строит турбины мощностью в 100 тыс. *квт* и выше. На рисунке 205 показан общий вид одной из таких мощных турбин.

Мощные паровые турбины питаются паром с давлением 90 *ат* и температурой 535° С, а также паром с давлением 135—240 *ат* и температурой 560—580° С. На электростанциях с этими турбинами расход топлива меньше, чем с турбинами, работающими на паре при 400° С и давлении 29 *ат*.

В настоящее время в Советском Союзе строятся паровые турбины мощностью до 500 000 *квт*, ведутся работы по созданию турбин мощностью 800 тыс. *квт*, разработаны проекты турбин мощностью 1 млн. и 1,5 млн. *квт*.

Коэффициент полезного действия паросиловой установки значительно повышается, если энергия отработавшего в турбине пара используется для работы паровых молотов и прессов, нагревает воду для бытовых нужд: для бань и прачечных, для отопления зданий и т. д.

Теплофикация — это централизованное снабжение жилых домов и промышленных предприятий энергией отработавшего пара. В Советском Союзе проблеме теплофикации уделяется очень

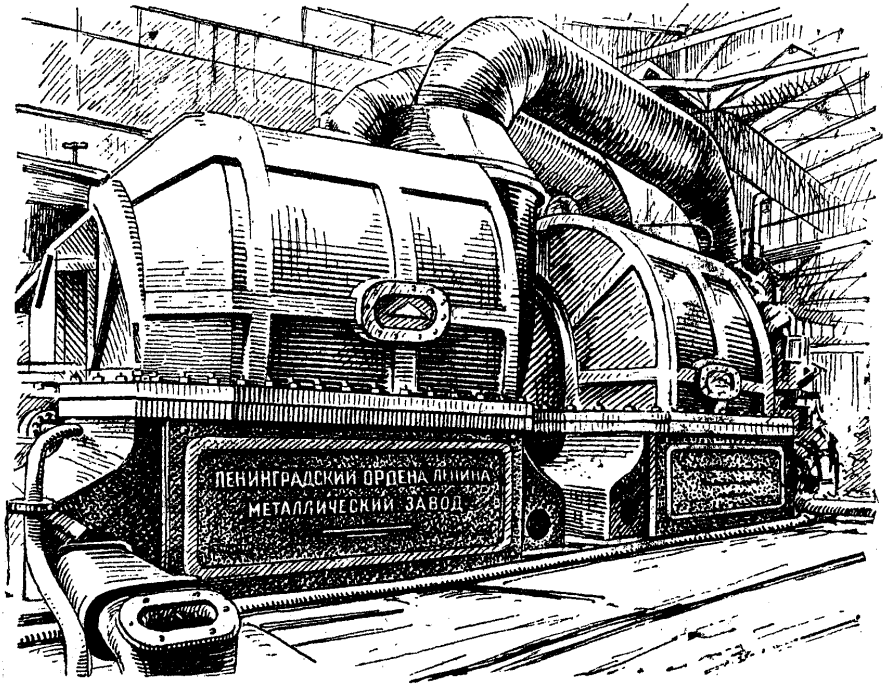


Рис. 205. Внешний вид паровой турбины высокого давления мощностью в 100 000 *квт*, изготовленной на Ленинградском металлическом заводе.

большое внимание. В ряде крупных тепловых электростанций отработавший пар от турбин нагревает воду, которая используется для отопления зданий.

На рисунке 206 изображена одна из возможных схем использования энергии пара на теплоэлектроцентрали. Перегретый пар из котла поступает в турбину, которая вращает ротор генератора. Отработавший в турбине пар частично поступает на производство, а часть его идёт в специальный подогреватель. В подогревателе пар нагревает воду, идущую на отопление, в бани, прачечные и на различные производства.

Конденсируясь в подогревателе, пар превращается в воду, которая специальными насосами затем подаётся в котёл.

130. Двигатель внутреннего сгорания. В паровых машинах и паровых турбинах для преобразования энергии топлива в механическую энергию используют водяной пар, который получается в паровых котлах. Наряду с этим существуют тепловые двигатели, в цилиндрах которых одновременно протекают процессы сгорания топлива, выделения при этом энергии и совершения за счёт части её механической работы; такие двигатели называются двигателями внутреннего сгорания. В этих двигателях используется жидкое или газообразное топливо. Жидкое топливо перед сжиганием испаряется или распыляется в воздухе.

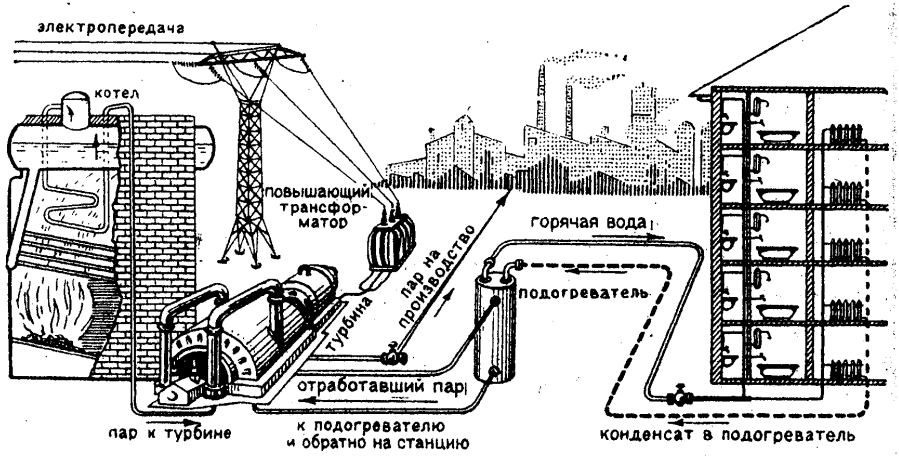


Рис. 206. Схема распределения пара, получаемого в паросиловой установке.

Рассмотрим сначала устройство четырёхтактного карбюраторного автомобильного двигателя. Принцип действия двигателей, применяемых на тракторах и самолётах, сходен с автомобильным.

Схема четырёхтактного двигателя внутреннего сгорания и диаграмма работы такого двигателя изображены на рисунке 207.

Из схемы видно, что внутри цилиндра *А* может свободно перемещаться поршень *В*. В верхней части цилиндра имеются два клапана. Через клапан *Д* производится впуск так называемой горючей смеси, состоящей из воздуха и мельчайших частиц жидкого или газообразного топлива. Клапан *Е* служит для удаления из цилиндра отработавших газов; *С* — запальник (свеча), назначение которого — воспламенять находящуюся над поршнем смесь.

На диаграмме, расположенной под схемой, изображены изменения, происходящие в состоянии рабочего вещества при движении поршня. Крайние положения поршня в цилиндре называются мёртвыми точками (в технике их называют верхней и нижней мёртвыми точками). От этих положений поршень начинает возвратно-поступательное движение.

Расстояние, проходимое поршнем от одной мёртвой точки до другой, называется ходом поршня. При движении поршня вниз специальный распределительный механизм открывает клапан *Д*, который в продолжение всего хода поршня до нижней мёртвой точки остаётся открытым. В течение этого хода в цилиндр через клапан поступает горючая смесь. Так как всасывание происходит при постоянном давлении, то на диаграмме этот процесс изобразится линией 0—1, параллельной оси абсцисс (рис. 207, I).

Когда поршень придёт в нижнюю мёртвую точку, клапан *Д* закрывается, начинается обратное движение поршня вверх и горю-

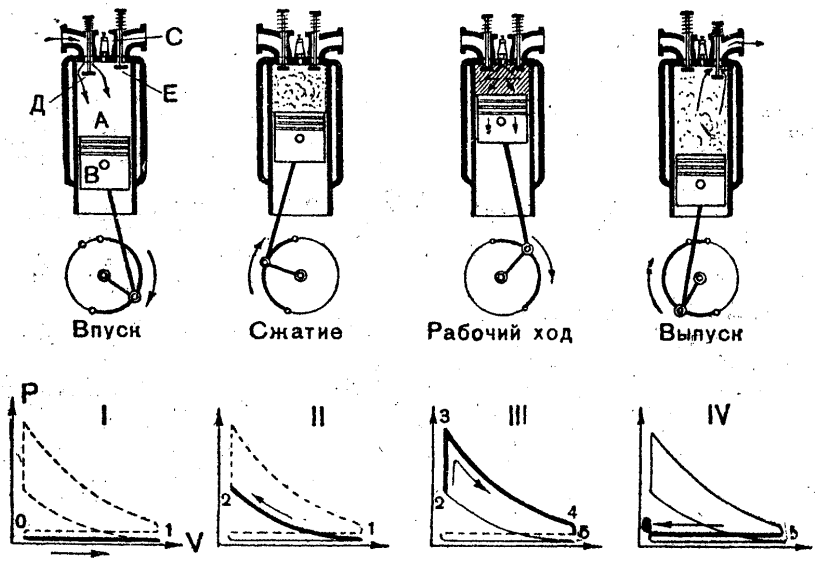


Рис. 207. Схема и диаграмма работы четырёхтактного карбюраторного двигателя.

чая смесь, находящаяся над поршнем, сжимается. Этот процесс на рисунке 207, II изображён линией 1—2. В момент, когда поршень вновь дойдёт до верхней мёртвой точки, происходит зажигание смеси (например, электрической искрой).

При сгорании смеси температура образующихся в цилиндре продуктов сгорания резко повышается; вследствие этого резко повышается и давление, причём этот процесс происходит очень быстро; поршень при этом не успевает заметно продвинуться, так что процесс повышения давления можно считать происходящим при постоянном объёме. На рисунке 207, III этот процесс изображён прямой 2—3.

Под влиянием высокого давления продуктов сгорания поршень начнёт перемещаться вниз; при этом продукты сгорания в цилиндре будут расширяться (этот процесс изображён на диаграмме кривой 3—4) и, когда поршень придёт в нижнюю мёртвую

точку, давление в цилиндре уменьшится. В этот же момент откроется клапан *E*, вследствие чего давление в цилиндре упадёт (линия 4—5).

При движении поршня от нижней мёртвой точки к верхней клапан *E* остаётся всё время открытым и находящиеся в цилиндре отработавшие продукты сгорания удаляются. Линия выпуска (5—6), изображённая на рисунке 207, IV, не совпадает на диаграмме с линией всасывания.

Процесс, в течение которого происходит засасывание горючей смеси, называется в п у с к о м, следующий ход — с ж а т и е м; за ним идёт расширение, или, как его называют, р а б о ч и й х о д (в начале этого хода происходят вспышка горючей смеси и резкое

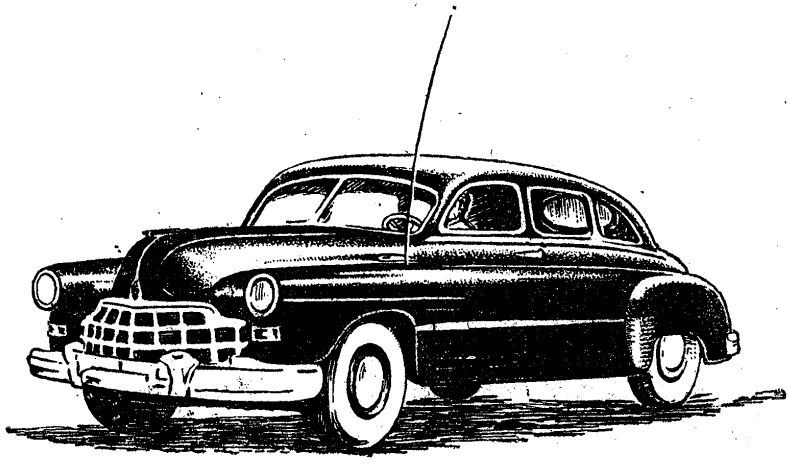


Рис. 208. Шестиместный легковой автомобиль с шестицилиндровым двигателем мощностью 90 *л. с.* производства Горьковского автозавода.

повышение давления, затем расширение продуктов сгорания), наконец, последний ход — в ы п у с к.

В разобранном нами двигателе — четыре хода, или, как говорят, четыре такта, и среди них только один рабочий такт, в течение которого двигатель совершает полезную работу. Такие двигатели называют ч е т ы р ё х т а к т н ы м и.

На валу двигателя укрепляется массивное маховое колесо, которое, запасая кинетическую энергию при рабочих ходах поршня, расходует часть её на совершение работы во время ходов впуска, сжатия и выпуска, обеспечивая плавный ход двигателя.

Для увеличения мощности машины четырёхтактные двигатели изготовляют с числом цилиндров от двух до восьми.

Применение двигателей внутреннего сгорания чрезвычайно разнообразно: автомобиль (рис. 208), самолёт (рис. 209), трактор и др.

На рисунке 211 показан разрез одноцилиндрового четырёхтактного двигателя внутреннего сгорания.

Основная часть двигателя — цилиндр *1*, закрытый сверху съёмной головкой *19*. Внутри цилиндра может передвигаться поршень *2*. Поршень представляет собой металлический стакан,

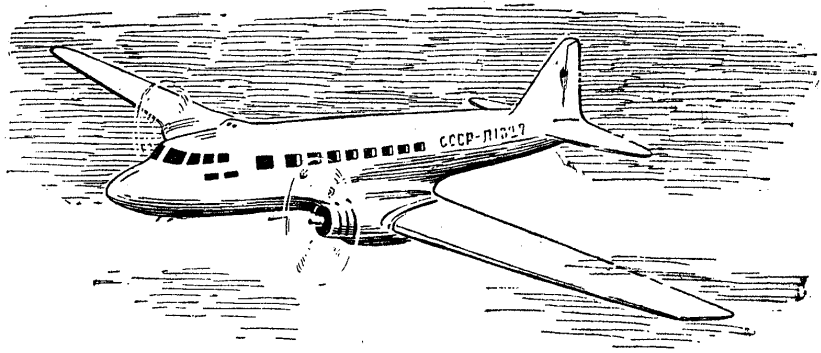


Рис. 209. Пассажирский двухмоторный самолёт в полёте.

опоясанный пружинящими кольцами *3*, которые вкладываются в канавки на поршне. Назначение поршневых колец — не пропускать газов, образующихся при сгорании топлива, в промежутки между

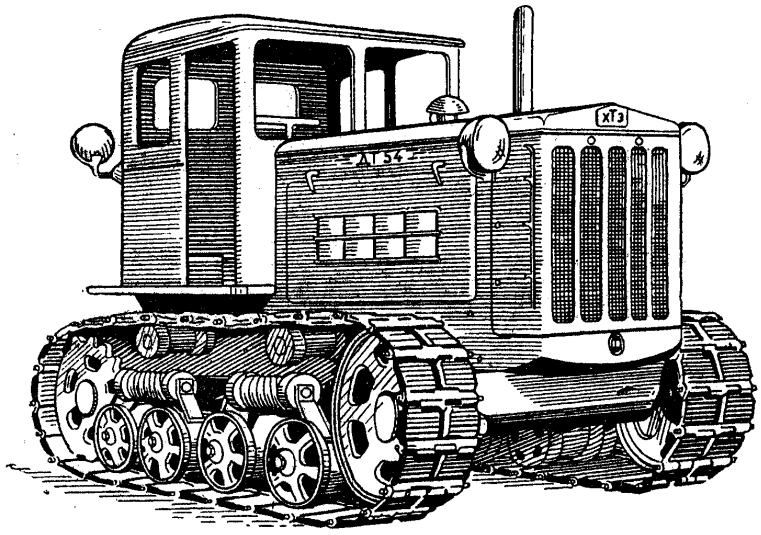


Рис. 210. Дизельный трактор ДТ-54.

поршнем и стенками цилиндра. Поршень соединён с шатуном *4*. Шатун служит для передачи движения коленчатому валу *5*.

Верхняя часть цилиндра сообщается с двумя каналами, которые могут закрываться и открываться при помощи клапанов *6* и *7*. Клапаны закрывают каналы с помощью пружин *8* (пружина клапана *7* на рисунке не показана). Клапаны открываются кулачками *9*, поднимающими при своём вращении толкатели *10*.

Кулачки укреплены на распределительном валу, приводимом во вращение при помощи шестерён *11*, *12*. Массивный маховик *13* предназначен для уменьшения неравномерности вращения коленчатого вала и вывода поршня из мёртвых точек.

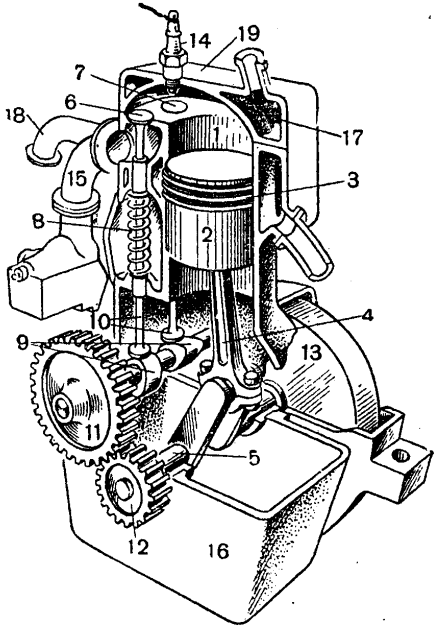


Рис. 211. Схематический разрез одноцилиндрового четырёхтактного двигателя внутреннего сгорания.

Кроме клапанов, в верхней части цилиндра помещается свеча *14* для зажигания смеси.

Горючая смесь подаётся в цилиндр по трубе *15*, которая соединена с карбюратором, а отработавшие газы выбрасываются из цилиндра по трубе *18*. Основанием для деталей кривошипного и распределительного механизмов, а также для защиты этих деталей от влияния наружной среды служит картер *16*. Нижняя часть картера является резервуаром для масла.

Головка и верхняя часть боковой поверхности цилиндра имеют двойные стенки; в пространстве *17* между этими стенками циркулирует вода, охлаждающая цилиндр, образуя рубашку охлаждения.

131. Двигатель внутреннего сгорания — дизель. От чего зависит коэффициент полезного действия двигателя внутреннего сгорания? Как и во всякой тепловой машине, в этом двигателе имеется источник энергии — нагреватель (таким источником является сгорающее топливо) и холодильник — атмосферный воздух. Чем выше разность температур между ними, тем выше к. п. д. двигателя.

Так как температура газов, получающихся при сгорании смеси, велика (порядка 1600—1800° С), то к. п. д. двигателей внутреннего сгорания значительно выше к. п. д. паровых машин. На практике к. п. д. двигателей внутреннего сгорания достигает 20—30%.

Как можно ещё повысить к. п. д. этого двигателя? Опыт и расчёты показывают, что для этого нужно добиться большей степени сжатия смеси. Однако в двигателях карбюраторного типа очень сильно сжимать горючую смесь нельзя, так как она, сильно нагреваясь, будет преждевременно самовоспламеняться.

Немецкий инженер Дизель изобрёл двигатель, названный его именем, работающий по такому циклу, который позволяет избежать указанных выше затруднений и значительно повысить к. п. д.

Рассмотрим принцип действия четырёхтактного дизеля. На рисунке 212 изображены схема устройства цилиндра и диаграмма работы дизеля. В головке цилиндра находятся: топливный клапан *B* (форсунка), клапаны всасывающий *C* и выхлопной *A*. Клапаны, а также топливный насос, питающий форсунку, получают движение от особого распределительного вала, который в свою очередь приводится в движение от коленчатого вала двигателя.

Пусть начальным положением поршня *a* будет верхняя (левая — из-за того, что цилиндр изображён в горизонтальном положении) мёртвая точка. При движении поршня вправо открывается всасывающий клапан *C*, через который в цилиндр засасывается воздух. Этот первый такт — всасывание — изображён на диаграмме (рис. 212) изобарой 0—1.

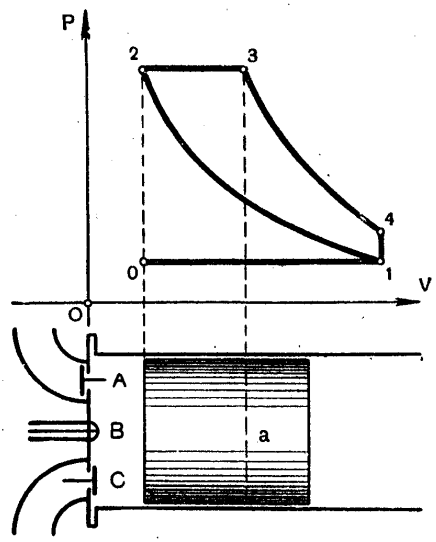


Рис. 212. Схема и диаграмма работы дизеля.

Всасывающий клапан *C* при обратном ходе поршня влево закрывается и в продолжение всего второго такта остаётся закрытым.

В цилиндре дизеля происходит сжатие воздуха (в бензиновом двигателе, как указывалось в § 130, сжимается горючая смесь).

На диаграмме этот процесс изображён кривой 1—2.

Степень сжатия в дизелях достигает большой величины (см. таблицу на стр. 212), вследствие чего температура воздуха в конце сжатия поднимается до температуры, достаточной для воспламенения топлива. В момент прихода поршня в верхнюю (левую) мёртвую точку начинается подача топлива в цилиндр из форсунки *B*. Попадая в горячий воздух, мелко распылённое форсункой топливо сгорает.

Топливо сгорает здесь не сразу, как в карбюраторных двигателях, а постепенно, в продолжение некоторой части хода поршня вправо. Процесс горения топлива вследствие этого происходит при увеличивающемся объёме рабочего пространства. Поэтому давление газов во время работы форсунки остаётся постоянным. На диаграмме горение представлено линией 2—3.

Таким образом, сгорание смеси происходит при постоянном давлении, в отличие от карбюраторных двигателей, где, как мы видели, сгорание происходит при постоянном объёме.

Дальнейшее расширение газов (кривая 3—4) продолжается до момента прихода поршня в нижнюю (правую) мёртвую точку.

Когда поршень придёт в нижнюю (правую) мёртвую точку, открывается выпускной клапан A и давление газов сразу падает (4—1), после чего поршень возвращается к левой мёртвой точке. В течение всего этого хода выпускной клапан A остаётся открытым; через него отработавшие газы выходят из цилиндра.

Линия выпуска 1—0 на нашей диаграмме для простоты показана совпадающей с линией всасывания.

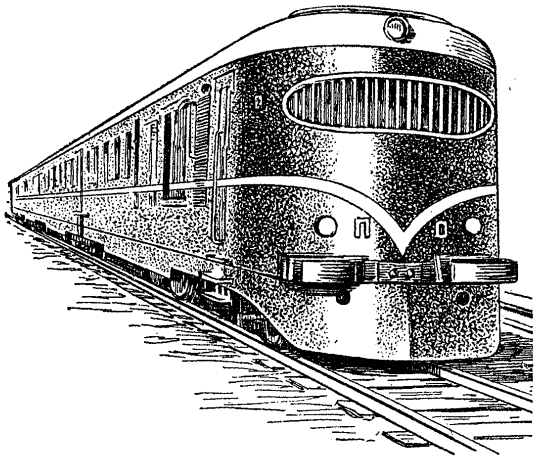


Рис. 213. Дизель-поезд на железнодорожном пути Москва — Ленинград.

Дизель оказался более экономичным двигателем, чем карбюраторный, его к. п. д. достигает 39%. Он может иметь значительно бо́льшую мощность (десятки тысяч лошадиных сил). Кроме того, дизель может работать на дешёвых сортах жидкого топлива.

Дизели большой мощности быстро нашли себе применение как в стационарных установках, так и на водном, железнодорожном и воздушном транспорте, а дизели малой мощности в последнее время с успехом начинают применяться в качестве двигателей автомашин, тракторов (рис. 210) и небольших судов. На рисунке 213 изображён тепловоз, а на рисунке 214 — общий вид дизельного судового двигателя мощностью 3250 *л. с.*

Ниже в таблице содержатся некоторые показатели, характеризующие дизели и карбюраторные двигатели.

Характеристика некоторых двигателей внутреннего сгорания

Тип двигателя	Степень сжатия	К. п. д., %	Расход горючего, $\frac{г}{л.с.ч}$
Дизели	12—20	30—39	160—210
Карбюраторные двигатели	5—10	18—24	250—350

Степенью сжатия называется число, показывающее, во сколько раз полный объём цилиндра больше объёма пространства сжатия.

132. Реактивные двигатели. Развитие авиации сводится в основном к увеличению скорости, высоты, грузоподъёмности, даль-

ности, надёжности полёта самолётов, что в значительной степени зависит от возможностей совершенствования двигателя.

Двигатели внутреннего сгорания с винтами-пропеллерами уже не обеспечивают увеличения скорости и высоты полёта самолётов. Причина этого заключается в следующем.

В самолёте с воздушным винтом последний, вращаясь, отбрасывает воздух, заставляя его двигаться ускоренно. По третьему закону Ньютона, отбрасываемая масса воздуха действует на винт, толкает его вперёд, создавая этим тягу, движущую весь самолёт. Тяга получается, таким образом, как результат ответного воздействия (реакции) воздуха, отбрасываемого винтом. Винт служит посредником, который за счёт энергии топлива совершает работу по передвижению самолёта.

Как показала практика, сила тяги винта уменьшается с увеличением скорости. Дело в том, что с увеличением скорости увеличивается сопротивление воздуха вращению винта; при скоростях, близких к скорости звука в воздухе $\left(\text{порядка } 1200 \frac{км}{ч}\right)$, это сопротивление становится огромным. В результате большая часть полезной работы двигателя идёт на преодоление сопротивления воздуха; коэффициент полезного действия двигателя уменьшается в десятки раз. Для увеличения скорости самолёта приходится резко увеличивать мощность двигателя, а это неизбежно приводит к увеличению веса самолёта. Например, увеличение скорости полёта самолётов на 150—200 $\frac{км}{ч}$ было достигнуто за счёт удвоения веса самолёта. Конечно, это экономически невыгодно. Мощность двигателя с винтом-пропеллером резко уменьшается также с увеличением высоты полёта. На большой высоте, где воздух сильно разрежён, воздушный винт вообще перестаёт двигать самолёт. Таким образом, самолёты с воздушными винтами-пропеллерами, приводимыми во вращение двигателями внутреннего сгорания, не могут обеспечить полётов на больших высотах с большими скоростями.

Свободными от указанных недостатков оказались реактивные двигатели, которые в настоящее время все более и более широко внедряются в авиацию, обусловливая её дальнейшее развитие.

В реактивных двигателях винт отсутствует. В этих двигателях энергия топлива непосредственно преобразуется в механическую энергию движущегося реактивного аппарата. Телами, взаимодействующими между собой, в них являются не винт и воздух, а струя газа, вытекающая из двигателя, и сам двигатель.

Струя газа, двигаясь с ускорением, создаёт реактивную тягу, действующую на двигатель в направлении, противоположном движению струи, — в направлении полёта.

Чтобы газовая струя получила в двигателе ускорение, необходимо иметь давление газа в двигателе большее, чем давление окружающей среды. Под действием разности давлений газовая струя будет непрерывно вытекать из двигателя и со-

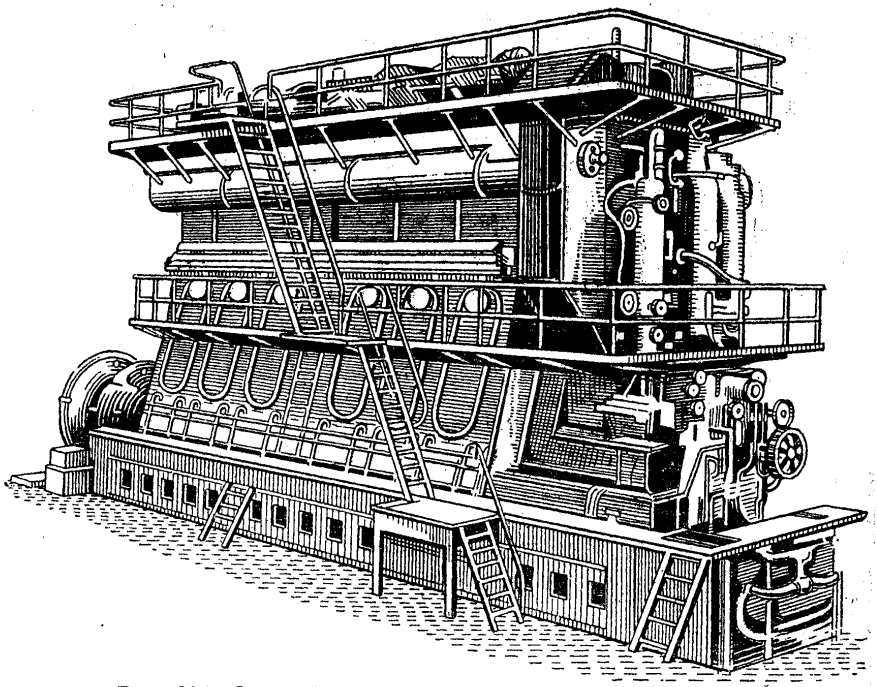


Рис. 214. Судовой двигатель-дизель мощностью 3250 *л. с.*

здавать реактивную тягу. Этого можно добиться путём непрерывного сжигания топлива в двигателе.

Реактивная тяга возникает при взаимодействии двигателя и струи, образующейся в самом двигателе, независимо от окружающей среды. Следовательно, если только обеспечить сгорание топлива в реактивном двигателе, он будет работать в высоких, разрежённых слоях атмосферы и даже в безвоздушном пространстве, т. е. там, где винтомоторная установка работать не может.

133. Основные виды реактивных двигателей. Все разнообразные виды реактивных двигателей состоят из следующих основных частей: 1) бака с топливом, 2) камеры, где это топливо сгорает, 3) устройств, обеспечивающих подачу топлива в камеру сгорания и истечение продуктов сгорания. В зависимости от вида используемого топлива реактивные двигатели разделяются на две большие группы: двигатели на твёрдом топливе, двигатели на жидком топливе.

Простейшим примером двигателя на твёрдом топливе служит пороховая ракета. В ракете при сгорании пороха образуются газы, которые выбрасываются из тела ракеты, создавая реактивную тягу.

В жидкостных реактивных двигателях (ЖРД) сгорают жидкие горючие вещества (нефтепродукты, спирт и т. д.). Жидкостные реактивные двигатели применялись в конце второй мировой войны для самолётов-снарядов дальнего действия. Скорость са-

молётов-снарядов достигала 5400 $\frac{км}{ч}$ при дальности полёта 290—300 *км* и высоте траектории 100 *км*.

К этому же роду двигателей относится ракетный двигатель для межпланетных сообщений, изобретённый К. Э. Циолковским.

Жидкостный реактивный двигатель — двигатель больших скоростей и больших высот полёта, однако он расходует слишком много топлива. Например, самолёты-снаряды, которыми гитлеровцы обстреливали во время второй мировой войны Лондон, расходовали в секунду около 130 *кг* горючей смеси.

Так как запас топлива на самолёте ограничен, то продолжительность и дальность полёта реактивного самолёта с жидкостным двигателем невелики. Кроме того, в таком двигателе должна быть устроена специальная камера, наполненная веществом, окисляющим горючее, а это увеличивает размеры и вес двигателя. Более экономичен воздушно-реактивный двигатель. В этом двигателе для окисления горючего используется кислород непосредственно из атмосферы, и, таким образом, необходимость в баке с запасом окислителя отпадает.

На рисунке 215 изображена схема воздушно-реактивного прямоточного двигателя. Его работа протекает следующим образом.

При полёте самолёта встречный поток воздуха проходит через напорное сопло и захватывает горючее, разбрызгиваемое форсунками. Образовавшаяся рабочая смесь поступает далее в камеру сгорания, где воспламеняется с помощью запальных свечей.

Газы, получающиеся в результате сгорания рабочей смеси, с огромной скоростью выбрасываются через выходное отверстие — сопло. Вследствие резкого увеличения давления при сгорании смеси скорость газов при выходе из сопла намного больше скорости входящего в двигатель воздуха. По закону сохранения количества движения (см. ч. I, § 55) благодаря этой разности скоростей и создаётся реактивная тяга.

Из изложенного следует, что прямоточный ВРД может работать только тогда, когда самолёт будет в движении. Ясно, что с таким двигателем взлетать самостоятельно самолёт не сможет; для этого необходим дополнительный двигатель.

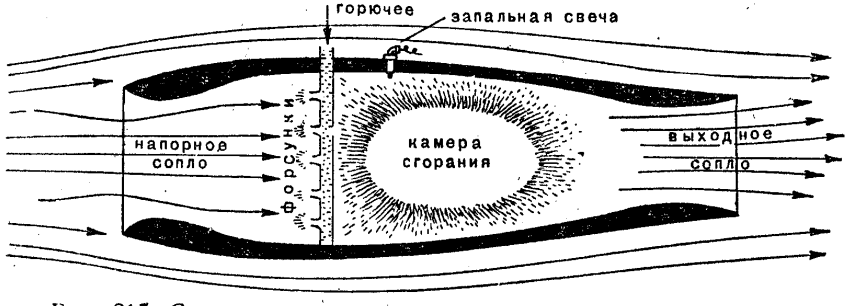


Рис. 215. Схема прямоточного воздушно-реактивного двигателя.

В настоящее время прямоточные ВРД ещё не получили распространения. Однако в будущем перед ними раскроются широкие перспективы, потому что они оказываются экономически очень выгодными при огромных скоростях полёта $\left(2000—3000\ \frac{км}{ч}\right)$.

В современной авиации широкое распространение получили турбокомпрессорные воздушно-реактивные двигатели, которые обеспечивают и взлёт, и полёт самолёта. Схема устройства одного из видов такого двигателя дана на рисунке 216.

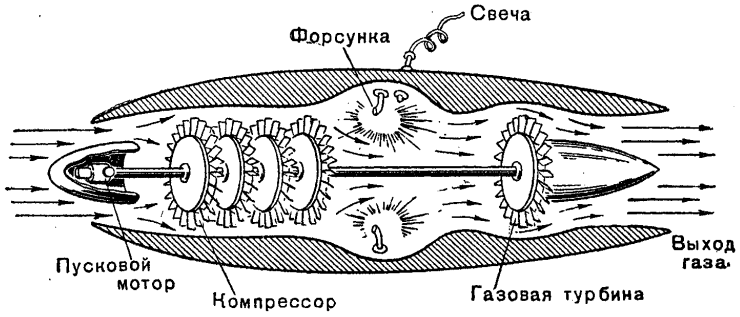


Рис. 216. Схема турбокомпрессорного двигателя.

Для создания тяги при взлёте самолёта необходимо устройство, обеспечивающее засасывание воздуха в камеру сгорания. В турбокомпрессорных ВРД таким устройством служит газовая турбина, связанная с компрессором. Из рисунка видно, что диск турбины сидит на одном валу с компрессором. Когда турбина начинает работать, она приводит в движение компрессор. Последний засасывает воздух и, сжимая его, подаёт в камеру сгорания. В остальном всё происходит так же, как в прямоточном ВРД.

Продукты сгорания, проходя через газовую турбину, отдают ей примерно половину своей энергии, их давление и скорость несколько уменьшаются. Оставшаяся энергия идёт на повышение скорости газов в сопловой части двигателя. Из выходного сопла вырывается мощная газовая струя, создающая реактивную тягу.

Современный турбореактивный двигатель легче поршневого двигателя той же мощности примерно в пять раз. При скоростях полёта в 900—1000 $\frac{км}{ч}$ развиваемая им мощность может доходить до 6500—7500 *л. с.*

В настоящее время в авиации широко применяются также турбовинтовые двигатели.

В турбовинтовом двигателе проходящие через турбину газы отдают ей бо́льшую часть своей энергии; поэтому газовая турбина развивает мощность, значительно превышающую ту, которая потребляется компрессором. Избыток мощности турбины расходуется на приведение во вращение воздушного винта, являющегося

основным источником тяги двигателя. Кроме того, в турбовинтовых двигателях получается некоторая дополнительная тяга от реактивного действия выходящих из сопла отработавших газов.

Дальнейшее усовершенствование реактивных двигателей представляет одну из первоочередных задач современной техники.

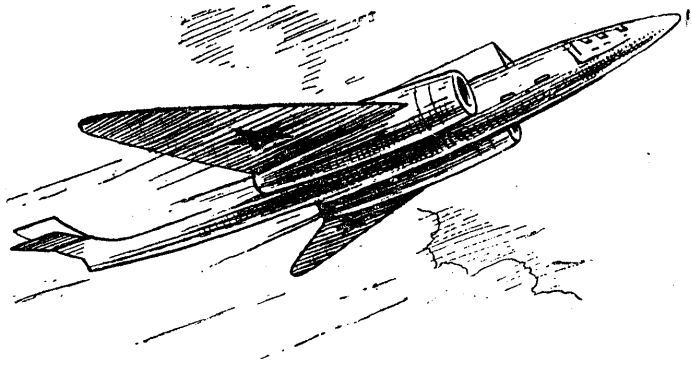


Рис. 217. Реактивный самолёт в полёте.

В Советском Союзе исследователи и конструкторы успешно работают над этой проблемой.

На рисунке 217 изображён один из типов самолёта с реактивным двигателем.

Упражнение 33.

1. Вычислить работу пара в цилиндре паровой машины при следующих условиях: пар поступает в цилиндр при давлении 20 *ат*; отсечка пара происходит на $^1/_4$ хода поршня, $^3/_4$ хода поршень перемещается за счёт расширения пара. В конце хода поршня пар имеет давление 2 *ат*. Площадь поршня 300 *см*^{2}, длина хода 60 *см*. При расчётах принять, что давление при расширении газа падает равномерно.

2. Определить работу пара в цилиндре двигателя, если пар поступает в цилиндр при давлении 15 *ат*, отсечка пара происходит на 0,1 **хода** поршня; дальнейшее движение поршня до конца цилиндра идёт при расширении пара до давления 1,2 *ат*. Площадь поршня цилиндра 500 *см*^{2}, ход поршня 60 *см*.

3. Определить теоретическую мощность паровой машины по следующим данным: диаметр поршня машины 50 *см*, длина хода поршня 80 *см*, среднее давление пара 12 *ат*. Число оборотов в минуту 240. (Указание: при числе оборотов 240 в минуту рабочих ходов 480.)

4. Вычислить мощность четырёхтактного нефтяного двигателя с одним цилиндром, если диаметр цилиндра 250 *мм*, ход поршня 300 *мм* и число оборотов в минуту 300. Среднее давление 4 *ат*.

5. Определить мощность двухтактного двигателя, диаметр цилиндра которого 300 *мм*, ход поршня 400 *мм* и число оборотов в минуту 360. Среднее давление 4,5 *ат*.

6. Определить мощность четырёхтактного двигателя с четырьмя цилиндрами. Диаметр цилиндра 200 *мм*, ход поршня 300 *мм* и число оборотов в минуту 400. Среднее давление 7,5 *ат*.

I. ДОПОЛНЕНИЕ К ТЕМЕ «ЗВУК». УЛЬТРАЗВУК И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

1. Генераторы и приемники ультразвука. Механические колебания, частоты которых лежат выше верхней границы слышимости (т. е. выше 20 000 *гц*), называют *ультразвуковыми колебаниями* или просто *ультразвуками*.

Наиболее распространённые генераторы ультразвуков — кварцевые генераторы, в основе устройства и работы которых лежит явление *пьезоэлектричества* [1], открытое в 1880 г. Пьером Кюри и его братом.

Сущность явления пьезоэлектричества состоит в следующем. Если определённым образом вырезать тонкую пластинку из кристалла кварца и подвергнуть её деформации растяжения или сжатия, то на её поверхности появятся электрические заряды. При этом

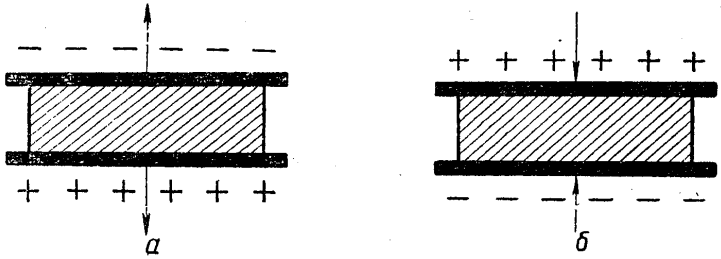


Рис. 1. При растяжении и сжатии кварцевой пластинки на её поверхности появляются электрические заряды.

растяжение пластинки по толщине (рис. 1, *а*) вызывает возникновение на её поверхности с одной стороны положительного заряда, а с противоположной стороны — отрицательного. При сжатии же пластинки знак зарядов меняется на обратный (рис. 1, *б*). Это явление называют *прямым пьезоэлектрическим эффектом*.

Наряду с прямым пьезоэлектрическим эффектом возникает иногда *обратный эффект*, заключающийся в том, что размеры кварцевой пластинки изменяются под действием переменного электрического поля. Если кварцевую пластинку поместить между металлическими электродами (например, покрыть пластинку с двух сторон

[1] Пьезо (по греч.) — давлю.

алюминиевой фольгой) и присоединить к ним электрическую батарею, то толщина пластинки несколько изменится (например, пластинка сожмётся). При изменении знака приложенного напряжения сжатие пластинки сменяется растяжением. Это явление получило ещё название *электрострикции*.

Если же к кварцевой пластинке подвести переменное напряжение, то в ней возникнут упругие колебания, частота которых равна частоте переменного напряжения. Пластинка будет совершать вынужденные колебания.

Чем выше частота переменного напряжения, тем с большей частотой колеблется пластинка. Так можно получить ультразвуковые колебания различной частоты.

Современная техника позволяет получать ультразвуковые колебания очень больших частот. Советский учёный С. Я. Соколов получил ультразвуковые колебания с частотой в миллиард герц, но и это ещё не предел.

С увеличением напряжения, подаваемого на кварцевую пластинку, амплитуда колебаний её увеличивается. Заметим, однако, что изменение размеров пластинки при ультразвуковых колебаниях очень мало, например при напряжении 1000 *в* толщина пластинки увеличивается или уменьшается всего лишь на $2 \cdot 10^{-5}$ *мм*.

Амплитуда колебаний пластинки сильно возрастает при совпадении частоты переменного напряжения с собственной частотой упругих колебаний пластинки, т. е. при резонансе.

Если колеблющуюся кварцевую пластинку поместить в какую-нибудь среду, например в воздух или в воду, то в этой среде будут распространяться *ультразвуковые волны*.

Ультразвуковые волны распространяются в воздухе почти с такой же скоростью, как и звуковые, но они сильно поглощаются углекислым газом. Наличие в воздухе значительного количества углекислого газа препятствует распространению ультразвуковых колебаний на большие расстояния. В воде и в твёрдых телах ультразвуки поглощаются меньше, чем в воздухе, и могут распространяться в них на значительные расстояния.

Применяя в качестве генератора кварцевые пластинки различного размера и формы, можно получать очень узкие ультразвуковые пучки большой интенсивности (мощности).

Кроме кварцевых излучателей, применяют ещё *магнитострикционные излучатели*. Было замечено, что в магнитном поле железный стержень несколько удлиняется (вдоль поля), а никелевый — укорачивается. Это явление получило название *магнитострикции*. Если такой стержень поместить в катушку, по которой проходит переменный ток, то стержень будет изменять свою длину в такт с изменениями тока, т. е. будет совершать вынужденные колебания, возбуждающие в окружающей среде ультразвуковые волны.

Прибор для приёма ультразвуков содержит те же элементы, что и генератор. Его действие основано на прямом пьезоэлектрическом эффекте, о котором говорилось выше.

2. Гидролокация. Отражение ультразвуковых волн от границы двух сред лежит в основе гидролокации — важнейшего применения ультразвука. *Гидролокацией* называют определение местоположения тел, находящихся в воде, с помощью ультразвука. Гидролокация была изобретена во время первой мировой войны (1914—1918 гг.) Полем Ланжевеном — прогрессивным французским учёным, другом Советского Союза.

Идея гидролокации весьма проста (рис. 2). Источник ультразвука (например, пьезокварцевый генератор), находящийся в днище корабля, излучает ультразвуковые волны в виде узкого направленного пучка, причём не непрерывно, а импульсами. Пауза между импульсами должна быть не меньше времени, за которое сигнал дойдёт до отражающего тела и вернётся обратно к приёмнику.

Приёмник (также пьезокварцевый) усиливает волны, отражённые или рассеянные поверхностью какого-либо тела, на которую попадает ультразвуковой пучок. Это может быть, например, поверхность погружённой в воду подводной лодки.

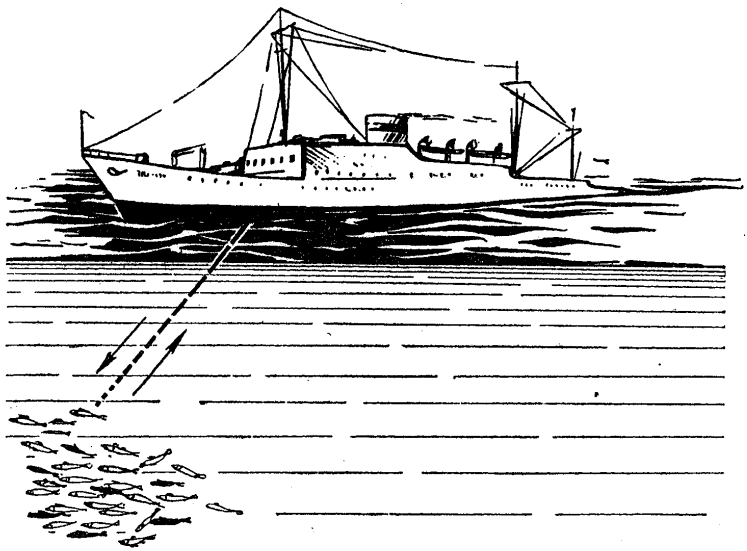


Рис. 2. Использование гидролокации для обнаруживания косяков рыб.

Особое устройство позволяет измерить время, в течение которого ультразвуковые волны пробегают расстояние от источника до отражающей поверхности и обратно. Зная скорость ультразвука, легко определить расстояние до этой поверхности. Можно даже довольно точно фиксировать положение тела в пространстве.

Изобретение Ланжевена было с успехом использовано в войне 1914—1918 гг. союзниками (Францией, Англией и Россией) для борьбы с германскими подводными лодками.

Современные рыболовные суда используют принцип гидролокации для обнаруживания косяков рыб (рис. 2).

3. Ультразвуковая дефектоскопия. Важное техническое применение ультразвука — ультразвуковая дефектоскопия, созданная советским учёным С. Я. Соколовым. Идею ультразвуковой дефектоскопии поясняет рисунок 3.

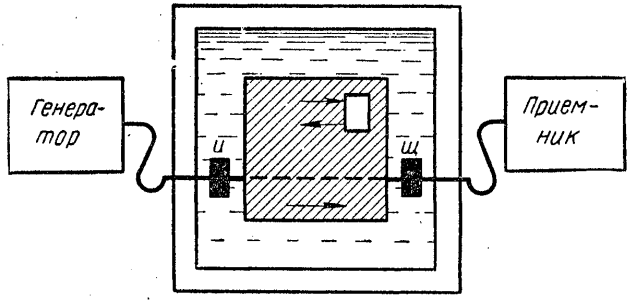


Рис. 3. Схема ультразвуковой дефектоскопии.

В бак с маслом погружены пьезокварцевые излучатель *и* и приёмник *щ* (щуп) ультразвука, а также исследуемое металлическое изделие. Если на пути ультразвука в металле нет трещин, интенсивность волны, достигающей щупа, сравнительно велика, что фиксируется соответствующими приборами приёмника. Но если в металле есть трещина, то ультразвук почти полностью отражается от неё и приемник не регистрирует ультразвуковых колебаний.

Метод ультразвуковой дефектоскопии нашёл сейчас широкое применение в нашей промышленности.

4. Некоторые другие свойства и применения ультразвука. Ультразвук служит причиной целого ряда механических, физико-химических и биологических эффектов. Так, поверхность жидкости, налитой в сосуд, внутри которого находится колеблющаяся кварцевая пластинка, приподнимается, образуя над кварцем бугор. При очень интенсивных колебаниях кварца на поверхности жидкости возникает фонтан. Палец, внесённый в этот фонтан, испытывает ощущение ожога. Две не смешивающиеся между собой в обычных условиях жидкости (например, вода и ртуть, вода и масло), налитые в пробирку, помещённую в такой фонтан, быстро образуют эмульсию. Это явление используют сейчас для получения различного рода эмульсий.

Ультразвуковые волны вызывают выделение пузырьков растворённых в жидкости газов, влияют на температуру кипения некоторых веществ, на время затвердевания расплавленного вещества и на характер кристаллизации.

Ультразвук ускоряет течение некоторых химических реакций, производит окислительное действие и т. д.

Некоторые организмы (маленькие рыбки, головастики, инфузории и др.) при действии на них ультразвука погибают.

Установлено, что воздействие ультразвука на семена некоторых растений (картофель, горох и др.) сокращает вегетационный период растений и увеличивает урожайность.

II. ДОПОЛНЕНИЕ К ТЕМЕ «ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ»

1. Изменение силы тяжести с широтой места и высотой над поверхностью Земли. Причина тяжести тел (их весомости) — действие на них сил тяготения Земли.

Если бы Земля была шаром и не вращалась вокруг своей оси, то сила тяжести на Земле была бы равна силе тяготения: $F = \gamma \frac{mM}{r^2}$.

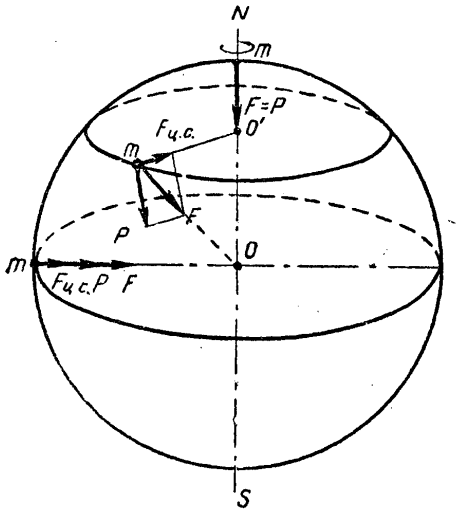


Рис. 4. Изменение силы тяжести с широтой места.

Но Земля несколько сплюснута у полюсов: полярный радиус её меньше экваториального примерно на 21 *км*. Главная же причина изменения силы тяжести — вращение Земли вокруг своей оси.

При вращении Земли линейные скорости точек, лежащих на разных широтах, различны: на полюсах линейная скорость равна нулю, а на экваторе она наибольшая. Поэтому силы, обеспечивающие круговое движение точек Земли, на разных широтах различны. Центростремительной силой в данном случае служит составляющая силы тяготения. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

На рисунке 4 схематически изображены различные положения тела m на поверхности Земли: в средних широтах, на полюсе и на экваторе. Вектор F — сила тяготения, с которой покоящееся (относительно Земли) тело притягивается Землёй.

Так как тело m вращается вместе с Землёй, то на него действует центростремительная сила $F_{ц.с.}$, которая представляет собой одну из составляющих силы тяготения F.

Другую составляющую силы тяготения — силу P — называют *силой тяжести*. Направление силы тяжести называют *отвесным*, оно, как видно из чертежа, только на полюсах и экваторе совпадает с радиусом Земли.

Наблюдатель, находящийся в центре Земли O, мог бы обнаружить действие обеих составляющих силы тяготения: центростремительной силы $F_{ц.\,с.}$ и силы тяжести P.

Наблюдатель же, находящийся на поверхности Земли и, следовательно, участвующий в её суточном вращении, будет наблюдать действие лишь одной составляющей — силы тяжести P.

Действие силы тяжести P проявляется двояко: динамически — в сообщении телам ускорения ($P = mg$) — и статически — в давлении на опору или в натяжении подвеса.

Действие силы тяжести на неподвижную относительно Земли горизонтальную опору или подвес принято называть *весом тела*.

Вес тела равен силе тяжести ($P = mg$).

На полюсах линейная скорость вращения точек Земли равна нулю, следовательно, равна нулю и центростремительная сила ($F_{ц.\,с.}$), поэтому на полюсах сила тяжести равна силе тяготения:

$$P_{\text{полюс}} = F = \gamma \frac{mM}{r^2}.$$

На экваторе центростремительная сила $F_{ц.\,с.}$ направлена, как и сила тяготения F, по радиусу к центру Земли, поэтому сила тяжести на экваторе

$$P_{\text{экватор}} = F - F_{ц.\,с.}.$$

Из формулы $P = mg$ следует, что ускорение силы тяжести g изменяется с изменением широты места. На полюсе $g_п = 9{,}83$ *м/сек*^{2}; на экваторе $g_э = 9{,}78$ $\frac{м}{сек^2}$. Ускорение силы тяжести на широте 45° и на уровне моря называют *нормальным*, оно равно $9{,}80665$ $\frac{м}{сек^2}$.

С высотой над поверхностью Земли сила тяжести убывает, что видно из формулы закона тяготения:

$$F = \gamma \frac{mM}{(R+h)^2},$$

где h — высота относительно поверхности Земли.

2. Поле тяготения. Силы тяготения, как мы видели, действуют на расстоянии. Но действуют ли при этом тела друг на друга непосредственно или между ними существует материальная среда, через которую и передаются гравитационные действия? На этот вопрос закон тяготения ответа не даёт.

Ньютон, открывший закон тяготения, не считал возможным непосредственное действие тел на расстоянии.

Рассмотрим два примера действия друг на друга тел, находящихся на расстоянии, через материальную среду, чтобы отметить существенный признак такого действия.

Мы можем, например, открыть дверь, не касаясь её непосредственно рукой, а потянув за конец верёвки, привязанной к ручке. В этом случае среда, через которую передаётся наше действие, — в е щ е с т в о, при этом в верёвке происходит процесс деформации, и для этого требуется время. Значит, действие передаётся через верёвку на дверь не мгновенно, а с конечной скоростью.

Другой пример. При запуске искусственных спутников ракетой-носителем управляют с Земли радиосигналы. И здесь связь осуществляется через материальную среду, но иного вида, чем вещество. Этот вид материи называют электромагнитным п о л е м. Передача радиосигнала электромагнитным полем тоже происходит не мгновенно, а с конечной скоростью. Скорость распространения радиосигнала равна наибольшей возможной скорости — скорости света, которая в вакууме равна приблизительно 300 000 $\frac{км}{сек}$, или $3 \cdot 10^{10}$ $\frac{см}{сек}$.

Таким образом, *конечная скорость — существенный признак передачи действия через материальную среду.*

Непосредственное же действие тел на расстоянии должно было бы происходить мгновенно, т. е. передаваться с бесконечно большой скоростью от одного тела к другому. Но это невозможно, так как наибольшая скорость в природе — скорость света в вакууме — конечна. Следовательно, и действие сил тяготения от одного тела к другому должно передаваться с конечной скоростью, т. е. через материальную среду. Такой средой является *поле тяготения.*

Рассмотрим вопрос о поле тяготения несколько подробнее.

Представим себе шаровую поверхность радиуса R, в центре которой находится материальная точка A с массой m_1. Поместим где-нибудь на этой шаровой поверхности другую материальную точку B с массой m_2. По закону тяготения сила F, действующая на каждую из этих точек, выразится формулой:

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{R^2}.$$

Нетрудно видеть, что величина этой силы не изменится, если точки A и B поменять местами.

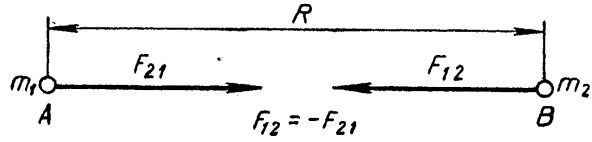


Рис. 5. Силы тяготения между двумя материальными точками.

Взаимное тяготение двух материальных точек можно представить так: точка B находится в поле тяготения точки A, и это поле действует на точку B с силой F_{12}. В то же время точка A, находясь в поле тяготения точки B, испытывает с её стороны действие такой же по величине силы F_{21} (рис. 5).

Обозначим ускорения точек A и B соответственно через g_1 и g_2.

На основе закона всемирного тяготения и второго закона Ньютона можно написать:

$$g_1 = \gamma \frac{m_2}{R^2}; \quad g_2 = \gamma \frac{m_1}{R^2}.$$

Эти равенства показывают, что ускорение, с каким движется одна материальная точка в поле тяготения другой под действием силы тяготения, не зависит от массы ускоряемой точки.

Значит, ***все тела, находясь в поле тяготения какого-либо тела на одинаковых расстояниях от центра тяготения, движутся под действием силы тяготения с одинаковым ускорением.*** Другими словами: $g = \gamma \frac{m}{R^2}$ есть величина постоянная для всех тел, находящихся на одинаковом расстоянии от центра тяготения. Эта постоянная величина может служить количественной характеристикой поля тяготения данного тела.

Как известно, заряженные тела могут притягиваться друг к другу и отталкиваться друг от друга. Значит, в электрическом поле наблюдаются и силы притяжения, и силы отталкивания.

В поле тяготения действуют только силы притяжения.

От действия сил электрического поля можно защититься, окружив себя, например, густой металлической сеткой. Но мы пока ещё не знаем, как можно защититься от действия сил тяготения. Учёные работают над этой проблемой.

3. Искусственные спутники Земли (ИСЗ). Запуск искусственных спутников Земли (сокращённо ИСЗ) имеет огромное научное значение, так как позволяет с помощью их и других космических аппаратов (космических ракет, автоматических межпланетных станций и т. п.) изучать на больших высотах состав атмосферы, распространение электромагнитных волн, космические лучи и другие тайны космоса.

Для того чтобы ИСЗ двигался по круговой орбите вокруг Земли, ему необходимо сообщить в горизонтальном направлении скорость определённой величины. Какова величина этой скорости?

Сила, заставляющая ИСЗ обращаться вокруг Земли, — это сила тяжести $P = mg$, действующая на спутник со стороны Земли. Эта сила обусловливает центростремительное ускорение, с которым спутник движется вблизи поверхности Земли по круговой орбите.

Таким образом, сила тяжести выполняет роль центростремительной силы:

$$mg = \gamma \frac{mM}{R^2} = \frac{mv_1^2}{R},$$

откуда $v_1 = \sqrt{gR}$, или $v_1 = \sqrt{\gamma \frac{M}{R}}$, где M — масса Земли; R — её радиус ($R = 6371 \cdot 10^3$ *м*).

$$v_1 = \sqrt{9{,}81 \frac{м}{сек^2} \cdot 6371 \cdot 10^3 м} \approx 7910 \frac{м}{сек} \approx 7{,}9 \frac{км}{сек}.$$

Эту скорость принято называть *первой космической скоростью*.

Все тела независимо от их массы могут стать искусственными спутниками Земли, если сообщить им горизонтальную скорость, равную первой космической скорости.

Круговая скорость ИСЗ убывает с высотой. Для круговой орбиты радиуса r можно написать:

$$\frac{mv_{кр}^2}{r} = \gamma\frac{mM}{r^2}; \quad v_{кр} = \sqrt{\gamma\frac{M}{r}}, \text{ где } r = R + h.$$

Например, на высоте 35 800 *км* скорость равна приблизительно 3 *км/сек*. Спутник на этой орбите будет иметь период обращения $T = 24$ часа (так называемый суточный ИСЗ). Такой спутник будет обращаться вместе с Землёй в её суточном вращении, и для наблюдателя на Земле он будет казаться неподвижным.

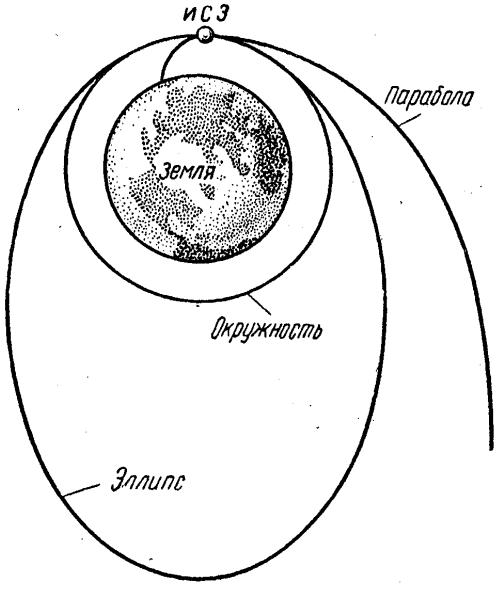


Рис. 6. Орбиты искусственных спутников.

На орбите Луны ($r = 384\,000$ *км*) круговая скорость равна около 1 *км/сек*.

Если скорость спутника окажется больше круговой скорости или если она направлена под углом к местному горизонту, то спутник будет двигаться вокруг Земли по эллипсу, ближайшая к Земле точка которого — *перигей* — лежит в точке разгона, а удалённая — *апогей* — в диаметрально противоположной точке орбиты.

При увеличении скорости до 11,2 $\frac{км}{сек}$, которую называют *второй космической скоростью*, орбита спутника настолько будет вытянута и апогей будет настолько удалён от Земли, что при незначительном превышении этой скорости спутник удалится за пределы действия поля тяготения Земли. Орбита спутника при этом не будет уже замкнутой в поле Земли — спутник навсегда уйдёт в межпланетное пространство (рис. 6).

При запуске ИСЗ и космических ракет учитывают также суточное и годичное обращение Земли, причём стремятся запустить ракету-носитель в плоскости, проходящей через центр тяжести Земли.

Чтобы сообщить спутникам необходимые скорости, нужны для их запуска мощные многоступенчатые ракеты. Высокий уровень техники в Советском Союзе даёт возможность строить такие ракеты.

4 октября 1957 г. в Советском Союзе был запущен первый в мире искусственный спутник.

12 апреля 1961 г. у нас был осуществлён первый запуск космического корабля «Восток» с человеком на борту. Пилотом корабля-спутника был лётчик-космонавт Герой Советского Союза Юрий Алексеевич Гагарин. Этот день навсегда войдёт в историю как начало эры освоения человеком космоса, как день триумфа творческого гения советского народа.

Подвиг Ю. А. Гагарина был повторен героями-космонавтами Г. С. Титовым, А. Г. Николаевым, П. Р. Поповичем, В. Ф. Быковским и другими советскими космонавтами.

На корабле «Восток-6» в июне 1963 г. длительный космический полёт совершила первая в мире женщина — советская героиня В. В. Терешкова.

4. Состояние невесомости. Весом тела называют силу, с которой тело вследствие притяжения Землёй давит на неподвижную (относительно Земли) горизонтальную подставку или натягивает нить подвеса. Вес тела равен силе тяжести $P = mg$.

Поскольку опора или подвес в свою очередь действуют на тело, то *характерный признак весомости — наличие в теле деформаций, вызванных его взаимодействием с опорой или подвесом.*

При свободном падении тел деформации в них отсутствуют, тела в этом случае находятся в *состоянии невесомости*. На рисунке 7 изображена установка, с помощью которой можно это обнаружить. Установка состоит из пружинных весов, к которым подвешен груз. Вся установка может двигаться по направляющим вниз и вверх.

Если весы с грузом свободно падают, то указатель весов стоит на нуле, значит, пружина весов при этом не деформирована.

Разберём это явление, пользуясь законами движения. Допустим, что груз, подвешенный на пружине, движется вниз с ускорением a. На основании второго закона Ньютона мы можем сказать, что на него действует сила, которая равна разности сил P и F, где P — сила тяжести, а F — сила упругости пружины, приложенные к грузу. Итак,

$$ma = P - F, \quad \text{или} \quad ma = mg - F.$$

Отсюда

$$F = m(g - a).$$

При свободном падении груза $a = g$ и, следовательно,

$$F = m(g - a) = 0.$$

Это указывает на отсутствие в пружине (и в грузе) упругих деформаций.

Состояние невесомости имеет место не только при свободном падении, но и при любом свободном полёте тела, когда на него

действует только одна сила тяжести. В этом случае частицы тела не действуют на опору или подвес и не получают под влиянием тяготения к Земле ускорения относительно этой опоры или подвеса.

Если установку, изображённую на рисунке 7, резким рывком за верёвку заставить свободно двигаться вверх, то указатель весов при таком движении будет стоять на нуле. И в этом случае весы и

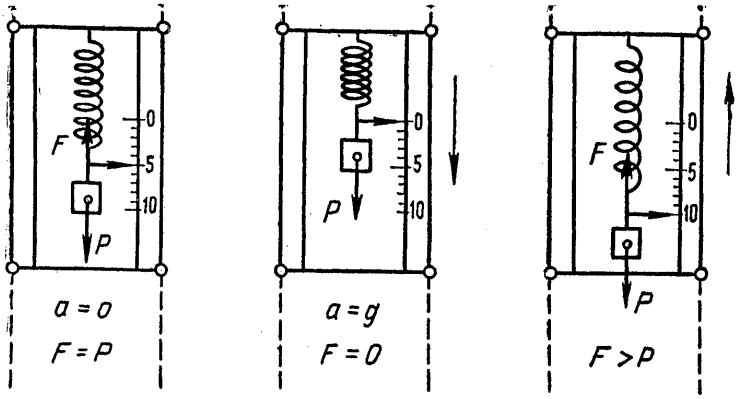


Рис. 7. Изменение силы натяжения пружины при движении груза вертикально вверх и вниз.

груз, двигаясь вверх с одинаковым ускорением, не взаимодействуют друг с другом.

Итак, ***если на тела действует лишь одна сила тяжести, то они находятся в состоянии невесомости, характерный признак которого — отсутствие у них деформаций и внутренних напряжений.***

Состояние невесомости не следует смешивать с состоянием тела, находящегося под действием уравновешенных сил. Так, если тело находится внутри жидкости, вес которой в объёме тела равен весу тела, то сила тяжести уравновешивается выталкивающей силой. Но тело будет давить на жидкость (как на опору), вследствие чего напряжения, вызванные в нём силой тяжести, не исчезнут, а значит, оно не будет находиться в состоянии невесомости.

Рассмотрим теперь невесомость тел на искусственных спутниках Земли. При свободном полёте спутника по орбите вокруг Земли сам спутник и все тела, находящиеся на нём, в системе отсчёта, связанной с центром массы Земли или с «неподвижными» звёздами, движутся с одинаковым в каждый данный момент времени ускорением. Величина этого ускорения определяется действующими на них силами тяготения к Земле (силы тяготения к другим космическим телам можно не учитывать, они очень малы). От массы тела, как мы видели (§ 2), это ускорение не зависит. При этих условиях между спутником и всеми находящимися на нём телами (а также

и между их частицами) взаимодействия, обусловленного тяготением к Земле, не будет. Это значит, что при свободном полёте спутника все находящиеся в нём тела будут в состоянии невесомости.

Не закреплённые в корабле-спутнике тела, сам космонавт свободно парят внутри спутника; жидкость, налитая в сосуд, не давит на дно и стенки сосуда, поэтому она не вытекает через отверстие в сосуде; отвесы (и маятники) покоятся в любом положении, в котором их остановили.

Космонавту, чтобы удержать руку или ногу в наклонном положении, не требуется никакого усилия. У него исчезает представление о том, где «верх» и где «низ».

Если сообщить какому-нибудь телу скорость относительно кабины спутника, то оно будет двигаться прямолинейно и равномерно, пока не столкнётся с другими телами.

Чтобы ликвидировать возможные опасные последствия действия состояния невесомости на жизнедеятельность живых организмов, и прежде всего человека, учёные разрабатывают различные способы создания искусственной «тяжести», например путем придания будущим межпланетным станциям вращательного движения вокруг центра тяжести. Сила упругости стенок будет создавать необходимое центростремительное ускорение и вызывать деформации в соприкасающихся с ними телах, подобные тем, которые они имели в условиях Земли.

5. **Перегрузки.** Если к пружинным весам подвесить груз и перемещать их ускоренно вверх, то деформации в пружине возрастут и весы поэтому будут показывать вес, больший того веса, который они отмечали в состоянии покоя.

Представим теперь себе, что космический корабль с космонавтом на борту во время подъёма вертикально вверх движется с ускорением $a = ng$, где $n > 1$.

На космонавта действуют сила тяжести $P = mg$ и сила тяги ракеты F, направленные в противоположные стороны вдоль одной вертикали.

Равнодействующая этих сил будет сообщать космонавту ускорение a, направленное вверх:

$$F - P = ma, \quad \text{или} \quad F - mg = ma,$$

откуда

$$F = m(a + g).$$

Но $a = ng$, следовательно,

$$F = (n + 1)mg.$$

Сила F вызовет деформации в теле космонавта и во всех частях корабля, которые в $n + 1$ раз превышают деформации, возникающие в этих телах на Земле при неподвижной ракете.

Всё выглядит так, как если бы на космический корабль, покоящийся относительно Земли, и на все находящиеся в нём тела действовала сила тяготения, в $n + 1$ раз превышающая силу земного тяготения (в общем случае в $\frac{a+g}{g}$ раз).

Если космический корабль движется вниз с ускорением $a > 2g$, то и в этом случае в корабле и находящихся в нём телах возникают деформации, превышающие нормальные (т. е. наблюдающиеся в телах на поверхности Земли в состоянии покоя). Это видно из равенств:

$$F + mg = ma,$$

$$F = m(a - g)$$

при $a > 2g$ $F > mg$.

Когда тела, движущиеся с ускорением, испытывают дополнительные деформации, принято говорить, что они находятся под действием *перегрузок*.

Величину перегрузок характеризуют отношением ускорения движения a к ускорению свободного падения g:

$$k = \frac{a}{g}.$$

Различной величины перегрузки испытывают не только космонавты, но и вообще все лётчики, когда самолёт (особенно реактивный) быстро изменяет (набирает, сбавляет) скорость.

Чтобы перегрузки не отражались вредно на состоянии здоровья, лётчики проходят длительную специальную тренировку.

Упражнение.

1. Объясните, как легче запустить на орбиту ИСЗ — вдоль экватора или вдоль меридиана?
2. Почему на одну и ту же орбиту труднее запустить тяжёлый спутник, чем лёгкий?
3. Как будет колебаться маятник в ракете, движущейся ускоренно вверх, в вертикально пикирующем самолёте?
4. Определите среднее ускорение и перегрузку, действующую при запуске ИСЗ, если многоступенчатая ракета-носитель за 7 *мин* 5 *сек* достигла первой космической скорости.
5. В некоторых проектах межпланетных станций искусственная «тяжесть» создаётся благодаря вращению станции (имеющей вид полого кольца) вокруг центра тяжести. Найдите число оборотов станции в минуту, при которых космонавт массой 70 *кг* чувствовал бы свою «тяжесть» так же, как на Земле. Расстояние космонавта от оси вращения 60 *м*.
6. Рассчитайте орбитальную скорость Луны как естественного спутника Земли, принимая её орбиту за окружность.
7. Что будет с монетой, если её положить в стакан с водой, когда они находятся внутри ИСЗ?
8. Будет ли в состоянии невесомости действовать на тела, погружённые в жидкость, выталкивающая сила? Иначе говоря: применим ли закон Архимеда для состояния невесомости?

9. В нижней части сосуда, наполненного жидкостью, имеется отверстие. Будет ли вытекать из этого отверстия жидкость при свободном падении сосуда?

10. В одно колено сообщающихся сосудов налита вода, в другое — ртуть. В состоянии покоя жидкости уравновешены. Изменятся ли уровни жидкостей при свободном падении сосудов?

11. Можно ли с помощью ртутного барометра измерить давление воздуха в кабине космического корабля при его движении вокруг Земли?

III. ДОПОЛНЕНИЕ К ТЕМЕ «СВОЙСТВА ТВЁРДЫХ ТЕЛ»

1. Изменение свойств и структуры металлов при механической и термической обработке. Рассмотрим практическое использование изученных нами свойств металлов.

Металлы обрабатывают или с целью получения необходимых форм и размеров изделия, или с целью изменения физико-механических свойств материала. Как увидим в дальнейшем, обработка металлов и в первом случае обычно сопровождается частичным изменением их свойств.

Изменения формы и размеров деталей достигают или деформируя металл давлением в пластическом состоянии — прокатка, ковка, штамповка, волочение, или снимая стружку — резание, точение, строгание, сверление и пр.

Изменения свойств и структуры материала достигают путём термической обработки — закалки, отпуска, отжига. Термическая обработка состоит в том, что металл нагревают до высокой температуры и затем подвергают быстрому (закалка) или медленному (отпуск, отжиг) охлаждению. При этом изменяется величина зёрен металла. Так, при закалке зёрна стали вследствие быстрого охлаждения не успевают вырасти и получается мелкозернистая структура, отличающаяся большой однородностью и твёрдостью.

Обработка металлов давлением применима только к металлам, обладающим достаточной пластичностью, т. е. к металлам, значительно деформирующимся без разрушения под действием нагрузки. При обычных температурах обработке давлением можно подвергать свинец, олово, алюминий, медь. Пластичность стали в холодном состоянии для этой операции недостаточна. При нагревании пластичность стали увеличивается, и в горячем состоянии её можно ковать, прокатывать и т. п.

Как изменяется структура металлов при обработке давлением? На рисунке *8, а* показана схема изменения зёрен металла при сжатии (зёрна до и после операции обозначены одинаковыми номерами). Рисунок *8, б* изображает деформацию одного из зёрен в крупном плане. Из рисунка видно, что в основе деформации лежит явление сдвига. Плоскости сдвига в отдельных зёрнах могут не совпадать, и в результате происходят ломка и измельчение зёрен. Это приводит к изменению свойств материала — твёрдость и хрупкость его увеличиваются, а пластичность уменьшается.

Описанное изменение свойств металлов при обработке их давлением в холодном состоянии, связанное с увеличением твёрдости и хрупкости, называют *наклёпом*.

У материала, подвергнувшегося наклёпу, увеличиваются упругие свойства (повышается предел текучести) и возрастает хрупкость. Проверить это можно на простом опыте. Если по латунной пластинке, обладающей сравнительно малой упругостью, постучать несколько раз небольшим молотком (проковать пластинку), то она приобретает свойство пружинить, сопротивляться изгибу, т. е. становится более упругой.

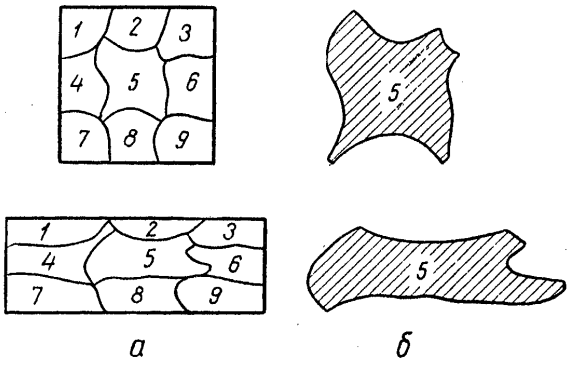


Рис. 8. *а*) Схема изменения зёрен металла при обработке его давлением. *б*) Деформация одного из зёрен.

Ковка, штамповка, волочение вызывают наклёп на поверхности обрабатываемого металла. Резание ножницами, продавливание и пробивание отверстий тоже вызывают наклёп на кромке металлического изделия. Поскольку наклёп увеличивает хрупкость металла, то выдавленные отверстия (для заклёпок, например) во избежание появления трещин растачивают, снимая хрупкий слой металла.

Под влиянием переменных (то в одном, то в другом направлении) напряжений прочность металлов с течением времени уменьшается. Это явление, известное под названием «*усталости металлов*», имеет место в быстроходных машинах, в осях железнодорожных вагонов, рессорах автомобиля. Полагают, что причина этого явления связана с усиленным ростом крупных кристаллов, что приводит к образованию так называемых «трещин усталости», постепенно разрастающихся в глубь детали. При этом полезная площадь поперечного сечения детали уменьшается и, наконец, сечение становится настолько малым, что наступает излом.

2. **Обработка металлов резанием.** Обработка металлов резанием — точение, строгание, сверление, — хотя и связана с потерей металла (образование стружки), служит основным средством изготовления деталей с высокой степенью точности. На рисунке 9 дана схема образования стружки. Резец *1*, перемещаясь, передней своей поверхностью *2* снимает и скалывает часть металла, образуя стружку. Срезаемый слой претерпевает при этом сложную деформацию сжатия и изгиба. Когда напряжение в срезаемом слое превзойдёт предел прочности металла, происходит скалывание элемента стружки.

Деформация распространяется и в глубь материала, в результате чего обрабатываемая поверхность получает при резании наклёп.

Происходящее при резании нагревание также изменяет физико-механические свойства срезаемого и остающегося поверхностного слоя. При этом надо учитывать влияние повышения температуры: 1) на обрабатываемый материал, 2) на материал резца.

Повышение температуры срезаемого слоя увеличивает его пластичность и тем самым способствует резанию.

Твёрдость же резца при повышении температуры понижается, и при больших скоростях резания он может потерять закалку. Прибавка к стали некоторых химических элементов (вольфрама, хрома и др.) делает резец стойким к повышению температуры до нескольких сот и даже до тысячи градусов.

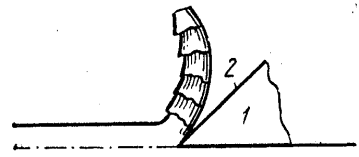


Рис. 9. Схема образования стружки.

Современная техника с успехом применяет вместо стальных керамические резцы, изготовляемые из окиси алюминия (исходный материал — бокситы). Наши токари-новаторы, пользуясь такими резцами, добились обработки деталей со скоростями свыше 3000 $\frac{м}{мин}$ (раньше скорость обработки была 20—60 $\frac{м}{мин}$).

Пластические деформации связаны с превращением части потенциальной составляющей внутренней энергии в кинетическую, т. е. с нагреванием. Нагревание увеличивается также благодаря трению резца о стружку и поверхность изделия. Для уменьшения трения и для отвода теплоты из зоны резания применяют различные смазочно-охлаждающие жидкости, например раствор мыла. Жидкость, проникая в микроскопические трещины на поверхности металла, производит, кроме того, расклинивающее действие, разрыхляет поверхностный слой металла и облегчает процесс резания.

3. Понятие о физических свойствах полимеров. Применение полимеров. Мы неоднократно отмечали условность деления состояний вещества на твёрдое, жидкое и газообразное. Существуют такие вещества, состояние которых не определено. Например, аморфные тела одновременно проявляют и твёрдость, и текучесть. К веществам с неопределённым состоянием относятся и *полимеры*.

Полимеры делятся на каучуки, волокна, пластмассы.

Существуют естественные (природного происхождения) полимеры — белки, клетчатка, крахмал, натуральный каучук — и искусственные полимеры — синтетические волокна, пластмассы, искусственный каучук.

Синтетические вещества всё более и более входят в нашу жизнь. Ими заменяют многие строительные материалы, их используют в машиностроении, в текстильной, автомобильной, электротехни-

ческой и других отраслях промышленности, из них делают одежду, обувь, предметы домашнего обихода.

Физика и химия, изучая строение и свойства этих веществ, позволяют человеку получать материалы с заранее намеченными, нужными свойствами.

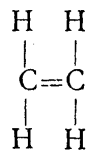
Удивительные свойства полимеров обязаны их строению. Все они состоят из множества больших молекул, содержащих иногда десятки тысяч атомов. Атомы, из которых построены молекулы полимеров, — это в основном атомы углерода и водорода, но часто в их число входят атомы хлора, фтора, азота и др.

Гигантские молекулы полимеров построены из ряда однородных структурных групп, получивших название *мономеров* (по-греч. м о н о с — один, п о л и — много). Процесс соединения этих групп называют *полимеризацией*.

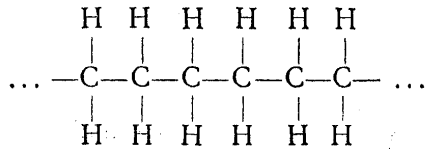
Свойством полимеризации обладают главным образом два химических элемента: углерод —C— и кремний —Si—. Атомы углерода (кремния), соединяясь между собой, могут образовывать длинные цепи —C—C—C—C—...; —Si—Si—Si—Si—... Поэтому различают две группы полимеров: полимеры, образовавшиеся на базе углерода, и полимеры, образовавшиеся на базе кремния.

Не рассматривая подробностей, относящихся к химии полимеров, остановимся на строении полимеров углеродного ряда, чтобы лучше понять физические свойства этих веществ.

Известное химическое соединение *этилен* — исходное соединение углеродного ряда полимеров — представляет собой бесцветный газ, молекулы которого состоят из двух атомов углерода и четырёх атомов водорода:

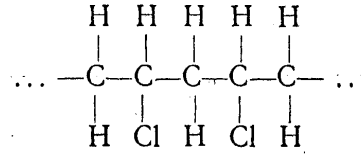


При помощи специальных катализаторов удаётся, разорвав двойную связь, соединить эти молекулы в длинную цепь из нескольких тысяч звеньев:



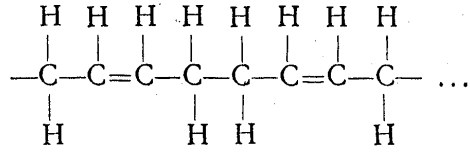
Полученное вещество уже не газ, а твёрдая прозрачная масса — *полиэтилен*. Из полиэтилена приготовляют оболочки для воздушных шаров, упаковочные пакеты, гибкие шланги и т. п.

Замена в длинной цепи молекул полиэтилена некоторых атомов водорода хлором даёт новое вещество — *поливинилхлорид*.



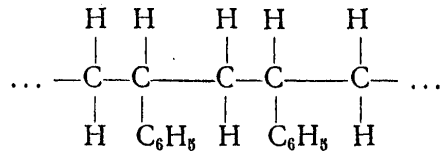
Из поливинилхлорида делают линолеум, сумки, плащи, водопроводные трубы и даже искусственные кровеносные сосуды.

Более сложная цепочка характерна для молекул *каучука:*



Естественный каучук, образующийся из сока некоторых растений, впервые был обнаружен европейцами в XVI в. в Мексике и привезён в Европу. Местное население делало из него мячи для детей, а также непромокаемую обувь для взрослых. Для последней цели они попросту обмазывали ноги липким соком, а потом терпеливо окуривали их в горячем дыму костра. Сок при этом затвердевал. Сейчас каучук — ценнейший технический материал, без которого немыслимо изготовление шин для современной мощной и изящной машины — автомобиля. Каучук приготовляют теперь искусственно; исходным материалом для него служит спирт, добываемый из древесины (нефти). Первый способ получения искусственного каучука был предложен нашим учёным С. В. Лебедевым (1909 г.).

Замена в полиэтилене некоторых атомов группами C_6H_5 приводит к образованию молекулы *полистирола*:



Полистирол — материал с очень хорошими электроизоляционными свойствами. Он идёт на изготовление различных деталей электротехнической и радиотехнической промышленности.

Ещё более сложное строение имеют молекулы *плексигласа* (органического стекла). Многие части приборов физического кабинета сделаны из этого материала, прекрасно обрабатываемого и обладающего к тому же превосходными изоляционными свойствами.

Кроме углерода и водорода, в состав молекул полимеров могут входить и атомы некоторых других элементов. Так, молекулы широко известного материала *капрона* построены из следующих ячеек:

$$\ldots\ —NH—(CH_2)_5—CO—\ \ldots$$

Длинные цепи молекул полимеров не растянуты прямолинейно, как это может показаться при рассмотрении формул. Вследствие относительной свободы теплового движения молекулы извиваются, закручиваются, переплетаются в клубок с соседними и более отдалёнными молекулами. В строении молекул полимеров заключается одна из причин их эластичности и прочности.

Всем известно свойство каучука растягиваться во много раз против первоначального размера и возвращаться в исходное состояние после снятия внешней нагрузки. Сила, требуемая для такой большой деформации каучука, во много раз меньше, чем для других упругих материалов. Модуль упругости каучука всего около 10 $\frac{кГ}{см^2}$, а стали — 2 млн. $\frac{кГ}{см^2}$ и более.

Опытами установлено, что высокоэластичная деформация полимеров не сопровождается изменением их объёма, меняется лишь форма образца, следовательно, потенциальная энергия при такой деформации не изменяется. Поэтому эластичность полимеров объясняется не «раздвижением» молекул, как это происходит в твёрдых телах, а именно особенностями структуры их молекул.

Свитые и перепутанные цепочки молекул под влиянием внешней нагрузки в какой-то степени распрямляются и приобретают ориентированное положение. После снятия нагрузки или при нагревании они вновь возвращаются к исходной структуре. Например, вазочка из плексигласа в горячей воде теряет форму и превращается в плоский кружок, из которого она была выштампована.

Интересно отметить, что указанное свойство полимеров — отсутствие упругости формы — аналогично свойству идеальных газов, у которых при деформации тоже не происходит изменения потенциальной энергии.

Подобно тому как сплетённые и скрученные естественные волокна (нити, верёвки, канаты) обладают повышенной прочностью по сравнению с таким же количеством линейно вытянутых волокон, волокна нейлона, капрона, вискозы (искусственного шёлка), стеклянные волокна обнаруживают исключительную прочность. Капроновая нить толщиной 1,5 *мм* выдерживает вес человека, а на верёвке диаметром 2 *см* из ацетонового шелка можно поднять гружёный товарный вагон.

Чтобы не создалось превратного представления о строении искусственного волокна, укажем, что длина отдельных молекул-«гигантов» остаётся всё же в пределах масштаба микромира: она может достигать лишь тысячных долей миллиметра. Получение длинных нитей, пригодных для дальнейшего прядения, надо представлять так же, как переплетение коротких шерстинок овечьей шерсти в нитку.

Длинные цепные молекулы могут образовать и трёхмерную структуру, когда устанавливается связь («мостики») между цепными молекулами. Тогда получаются уже не волокна, а плёнки и куски, которым путём различных методов обработки придаётся желаемая форма.

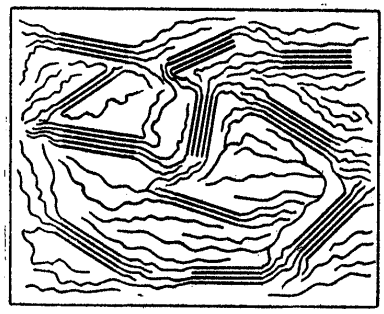


Рис. 10. Схема расположения нитеобразных молекул полимера.

Полимерные вещества с линейным строением молекул могут принимать кристаллическую структуру. Однако кристаллизация в этих телах в отличие от аморфных тел не распространяется на всю длину цепи, а ограничивается лишь отдельными участками. При этом длинная нитеобразная молекула может несколько раз входить в область упорядоченного (кристаллического) расположения частиц (рис. 10). Полимеры, имеющие пространственную структуру, не образуют кристаллических областей потому, что связи между отдельными цепями не позволяют им расположиться упорядоченно.

Большинство синтетических материалов имеет очень малый удельный вес. В среднем они в два раза легче алюминия, в четыре — шесть раз легче меди, а некоторые легче пробки. Полученные продуванием воздуха через расплавленную массу полимера так называемые *пенопласты* не только поразительно легки, но и обладают прекрасными теплоизолирующими свойствами. Их применяют, между прочим, и при строительстве домов для участников арктических и антарктических экспедиций.

Прибавляя в основную массу полимеров специальные «наполнители», можно получать материалы с необычными свойствами: твёрдостью и прочностью, превышающей сталь, сопротивляемостью коррозии и гниению, огнестойкостью и тугоплавкостью, устойчивостью против действия кислот и других химических веществ.

Знание структуры вещества и умение изменять её для получения материалов с заданными свойствами придают всей отрасли физики и химии полимеров многообещающие перспективы развития.

ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

1. 1) $S = 120$ *м*; $v = 50\,\frac{м}{сек}$; 2) $S_1 \approx 7{,}1$ *м*; $v \approx 14\,\frac{м}{сек}$; 3) $5\,\frac{м}{сек}$; 4) $\approx 15\,\frac{м}{сек}$. **3.** 3) Шар бóльшей массы будет находиться на расстоянии 4 *см* от оси; меньшей массы — на расстоянии 8 *см*; 5) $v \approx 8{,}9\,\frac{м}{сек}$; $h = 20$ *м*. **4.** 1) $v_{сек} \approx 0{,}084\,\frac{см}{сек}$; $\omega_{сек} \approx 0{,}105\,\frac{1}{сек}$; $v_{мин} \approx 0{,}0035\,\frac{см}{сек}$; $\omega_{мин} \approx 0{,}0018\,\frac{1}{сек}$; $v_ц \approx 0{,}00022\,\frac{см}{сек}$; $\omega_ц \approx 0{,}00015\,\frac{1}{сек}$; 2) $\approx 10\,\frac{м}{сек}$; 3) $\omega = 0{,}00007\,\frac{1}{сек}$; $v \approx 261\,\frac{м}{сек}$. **5.** 1) 625 *мм*; 2) $z_2 = 80$; $n_2 = 50\,\frac{об}{мин}$; 3) 56,52 *л. с.*; 4) $\approx 176{,}4$ *кГ*. **7.** 2) $\approx 70{,}7$ *Г*; 3) 50 *гц*; 4) 4 *гц*. **8.** 1) $\approx 24{,}8$ *см*; 2) $\approx 986\,\frac{см}{сек^2}$; 3) ≈ 4 *см*; 9 *см*. **9.** 3) 10 *см*; 4) 42°50′. **12.** 1) $\approx 1{,}2$ *сек*; 2) 17 *м*; 3) 765 *м*; 4) ≈ 12 *м*; ≈ 8 *см*; 5) $\approx 3900\,\frac{м}{сек}$. **17.** 2) 65°; 3) 0,6 *л*; 4) 25 *л*; 5) $2\,\frac{кал}{см^2 мин}$. **18.** 1) 8500 *кал*; 2) 8°; 4) 16,8°; 6) $\approx 0{,}12\,\frac{кал}{г \cdot град}$; 7) $0{,}09\,\frac{кал}{г \cdot град}$; 8) 650° С; 9) ≈ 440 *ккал*. **19.** 1) 0,015 *кГм*; 3) 2 989 000 *кГм*; 4) $\approx 4{,}8$ *ккал*; 5) $\approx 0{,}47$ *ккал*; 6) $\approx 0{,}45$ *кг*; 7) $\approx 165{,}6$ *т*; 8) ≈ 21 *кал*; 9) $\approx 6{,}8$ *т*. **20.** 1) 0,012 *м*; 3) $\approx 0{,}000036$. **21.** 1) 2 *л*; 2) 200 *л*; 3) 2,5 *ат*; 4) 2 *ат*; 5) $\approx 1{,}5$. **22.** 3) $\approx 20\,\frac{кГ}{см^2}$; 4) $P = 258$ *Г*, $D = 0{,}01032\,\frac{г}{см^3}$; 5) $0{,}00258\,\frac{г}{см^3}$. **23.** 1) $\approx 6{,}82$ *л*; 2) ≈ 649 *см*^{3}; 3) 273° С; 4) $\approx 109{,}1$ *л*. **24.** 2) ≈ 777 *мм рт. ст.* **26.** 2) $\approx 5{,}1$ *л*; 3) $\approx 0{,}51$ *ат*; 4) $\approx 2{,}09$ *л*; 5) $\approx 605°$ К; 6) $D_t = D_0\,\frac{p}{p_0(1+\gamma t)}$. **27.** 1) 30,2 *см*; 2) $\approx 73{,}6\,\frac{дин}{см}$. **28.** 1) ≈ 9 *мм*, $\approx 11{,}5\,\frac{кГ}{мм^2}$; 2) 0,032 *кГм*. **29.** 2) $\approx 8800\,\frac{кГ}{см^2}$; 3) 62,8 *кГ*; 4) ≈ 4, $\approx 1{,}7$. **30.** 1) 800 *ккал*; 2) 12 576 *ккал*; 3) 3538 *ккал*; 4) 196 *ккал*; 5) $\approx 79{,}8\,\frac{ккал}{кг}$; 6) 232 *ккал*. **31.** 1) 639 *ккал*; 2) 61,9 *ккал*; 4) $537\,\frac{кал}{г}$; 5) 719 *ккал*; 6) 3741,5 *ккал*; 7) $\approx 14{,}7$ *кг*. **32.** 1) 93,5%, 65%, 45,9%; 2) $\approx 8°$ С; 3) $\approx 75\%$; 4) уменьшится до 43,4%; 5) $\approx 0{,}4$ *м*^{3}. **33.** 1) 2385 *кГм*; 2) 2637 *кГм*; 3) $\approx 2009{,}6$ *л. с.*; 4) 19,6 *л. с.*; 5) 102 *л. с.*; 6) 125,6 *л. с.*

Цена 28 коп.

ПРОСВЕЩЕНИЕ • 1966